



EESTI MAAÜLIKOOL

Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Siim Sellik

**SILLAMÄE PRÜGILA METAANILAGUNDUSKATTE  
UURING**

**THE STUDY OF METHANE DEGRADATION LAYER IN  
SILLAMÄE LANDFILL**

Magistritöö

Linna- ja tööstusmaastike korralduse õppekava

Juhendajad: professor Mait Kriipsalu, *PhD*

professor Valdo Kuusemets, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Siim Sellik		Õppekava: Linna- ja tööstusmaastike korraldus	
Pealkiri: Sillamäe prügila metaanilagunduskatte uuring			
Lehekülgi: 75	Jooniseid: 28	Tabeleid: 5	Lisasid: 3
Osakond: Keskkonnakaitse ja maastikukorralduse õppetool			
Uurimisvaldkond: Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll (T270)			
Juhendaja(d): prof Mait Kriipsalu, prof Valdo Kuusemets			
Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu 2018			
<p>Prügilates tekkiv prügilagaas on kahjulik keskkonnale. Prügilatest, mis on ühed suuremad inimtekkelise metaani allikad, paisatakse tuhaneid tonne kasvuhoonegaase atmosfääri. Metaan on süsihappegaasist kahjulikum kasvuhoonegaas ning selle paiskamist atmosfääri tuleb vältida. Prügilaist lähtuvat metaani on võimalik lagundada mikrobioloogiliselt bioaktiivses kattekihis.</p> <p>Ida-Virumaal asuva Sillamäe prügila sulgemistöõde käigus kasutati metaanilagunduskatte rajamiseks Eestis esimest korda bioloogiliselt-mehaaniliselt töödeldud jäätmeid. Käesoleva magistritöö raames uuriti Sillamäe prügilale rajatud bioaktiivse-kattekihi tõhusust metaani lagundamisel. Selleks mõõdeti gaasi koostist portatiivse gaasianalüsaatoriga GA 5000 kokku viiel korral, neist neljal korral prügila pinnalt ning neljal korral 50 cm sügavusel kattekihis. Suurima metaani sisaldusega punktidesse lisati mõõtepunkte juurde, et kindlaks määrata metaani lekkekoha ulatus. Ühel korral kaevati neljas kohas kattekiht lahti, et analüüsida prügila erinevatest kohtadest ja erinevatest sügavustest kogutud proovide omadusi ja koostist. Välitöid tehti ajavahemikus 28.06.2017–05.05.2018.</p> <p>Tulemustest selgus, et Sillamäe prügila metaanilagunduskatte töötab, sest metaani lekkimist läbi kattekihi ei täheldatud: metaani leidus 49-st mõõtepunktis peamiselt kolmes piirkonnas ning ühel korral seitsmes punktis, kuid emisioonid olid väga väikesed. Metaani lekkekohad asuvad prügila ida- ja läänepoolsetel nõlvadel. Kattematerjali füüsikalise-keemiliste omaduste analüüsi põhjal saab järeldada, et Sillamäe prügila pinnas on metaani lagundavatele mikroorganismidele sobivaks elukeskkonnaks. Peamistes lekkekohtades tuleks läbi viia täiendavaid uuringuid, et välja selgitada metaani lekkimise põhjused.</p>			
Märksõnad: prügilagaas, metaani emissioon, metaani lagundamine, metanotroofid			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Siim Sellik		Specialty: Management of Urban and Industrial Landscapes	
Title: The study of methane degradation layer in Sillamäe landfill			
Pages: 75	Figures: 28	Tables: 5	Appendixes: 3
Department: Chair of environmental protection and landscape management			
Field of research: Environmental technology, pollution control (T270)			
Supervisors: prof Mait Kriipsalu, prof Valdo Kuusemets			
Place and date: Tartu 2018			
<p>Landfill gas has negative effect to environment. Landfills which are among the largest anthropogenic source of methane emissions emit thousands of tons of greenhouse gases to atmosphere. Methane is stronger greenhouse gas than carbon dioxide. Therefore, the emission of methane to atmosphere should be prevented or at least reduced. Methane emissioon can be reduced with methane degradation layer.</p> <p>First time in Estonia the Mechanically biologically treated municipal waste was used to construct methane degradation cover layer in Sillamäe landfill, Ida-Virumaa. The aim of this master's thesis was to investigate the efficiency of Sillamäe landfill's methane degradation layer. Emissions of methane were measured totally five times – four times on the top of cover layer and four time at a depth of 50 cm with in the cover layer. Additional measuring points were added where any leakage of methane was detected. Cover layer was excavated in four places to investigate its properties and composition. The fieldwork in Sillamäe landfill was carried out from 28.06.2017 to 05.05.2018.</p> <p>The results showed that methane degradation layer works. Methane was detected only from three to seven measuring points out of 49 and emissions were very small. The main leakage of methane is on the east and west hillsides. Overall the analyzed parameters of Sillamäe landfill cover layer samples are a suitable environment for methanotrophic bacteria. Reasons for methane emission on top of landfill require further investigation.</p>			
Keywords: landfill gas, methane emission, methane degradation, methanotrophs			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1. TEOREETILINE ÜLEVAADE.....	8
1.1. Prügilagaas .....	8
1.1.1. Prügilagaasi keskkonnamõju .....	8
1.1.2. Prügilagaasi tekkimine .....	9
1.2. Prügilagaasi emissioonide leevendamine.....	11
1.3. Seadusnõuded prügilagaasi käitlemisel .....	11
1.4. Metaanilagunduskate .....	12
1.4.1. Metaani bioloogiline lagundamine .....	12
1.4.2. Metaanilagunduskihi tõhusus .....	13
1.4.3. Metaanilagunduskihi konstruktsioon.....	15
1.5. Prügilagaasi seire ja mõõtmine.....	17
1.6. Sillamäe prügila sulgemine .....	19
1.6.1. Prügila iseloomustus .....	19
1.6.2. Prügilale kuju andmine .....	21
1.6.3. Prügila kattekiht.....	21
2. MATERJAL JA METOODIKA .....	23
2.1. Mõõtmispunktide valik .....	23
2.2. Prügilagaasi mõõtmine prügila pinnalt .....	24
2.3. Prügilagaasi mõõtmine prügila kattekihi seest .....	26
2.4. Pinnaseproovide võtmine .....	27
2.5. Pinnaseproovidest füüsikalise-keemiliste parameetrite määramine .....	29
2.6. Pinnaseproovide sõelumine .....	29
2.7. Andmetöötlus ja -analüüs.....	30
3. TULEMUSED JA ARUTELU .....	31
3.1. Prügilagaasi emissioonid prügila pinnalt ja kattekihist .....	31
3.2. Sillamäe prügila katematerjali füüsikalise-keemilised omadused .....	38

3.3. Prügila kattekihi hapnikutarve ja metaani lagundamise kiirus .....	39
3.4. Sõelanalüüsi tulemused .....	40
3.5. Prügilagaasi sisalduse muutumine ajas pinnalt ja kattekihis.....	42
KOKKUVÕTE .....	46
KASUTATUD KIRJANDUS .....	48
LISAD .....	54
LISA 1. Sillamäe prügila mõõtmispunktide ning kaevete koordinaadid .....	55
LISA 2. Sillamäe prügilal teostatud prügilagaasi emissiooni mõõtmiste tulemused prügila pinnalt .....	56
LISA 3. Sillamäe prügila kattekihi kaevamise tulemused .....	74

## SISSEJUHATUS

Prügilaid peetakse kõige ebasõbralikumateks keskkonnarajatisteks, sest neist lähtub mitmesuguseid ohte, sh prügilagaasi (Both 2001). Orgaaniliste jäätmete anaeroobsel lagunemisel tekib prügilagaas, mis üldjuhul koosneb 55–60% metaanist ja 40–45% süsihappegaasist (Scheutz et al. 2009). Prügilagaas on keskkonnale kahjulik kasvuhoonegaas, mis soodustab atmosfääri soojenemist. Metaani globaalse soojenemise potentsiaal on süsihappegaasist 28 korda suurem (IPCC 2013), mistõttu just metaani kokku kogumine ja hävitamine on oluline. Inimtekkelistest metaani emissioonidest annavad prügilad väga suure osa maailmas. Prügilagaas on tule- ja plahvatusohtlik ning võib kaasa aidata prügilapõlengutele, võib takistada prügila sulgemisjärgset haljastamist ja võib kahjustada prügila teeninduspersonali tervist. Prügilagaasist soojus- või elektrienergia tootmine võib ennast ära tasuda suurtes prügilates, aga kindlasti mitte väikestes.

Paljudes riikides üle maailma on tunnistatud muutusi kliimas ning nende leevendamise üheks peamiseks lahenduseks peetakse inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitekoguste vähendamist (Scheutz et al. 2009). Valitsustevaheline Kliimamuutuste Nõukogu (*International Panel of Climate Change*) andmete kohaselt toodavad prügilad vähemalt 5% kogu maailma kasvuhoonegaasidest, selles olev metaan moodustab aga omakorda ligikaudu 18% maailma metaaniemissioonist (IPCC 2007).

Kõigis uutes prügilates on prügilagaasi kogumise- ja taaskasutamise süsteemid kohustuslikud. Väikeprügilates ei pruugi gaasi kogumine olla tehniliselt võimalik või majanduslikult otstarbekas, mistõttu keskendutakse teadustöodes üha rohkem odavate tehnoloogiate arendamisele, mis piiraks prügilagaasi lekkimist (Barlaz et al. 2004, Dever et al. 2007, Stern et al. 2007). Suur osa nendest uuringutest käsitleb metaanilagunduskattekihte, mis võimaldaks võimalikult väikeste kuludega oksüdeerida metaani kohapeal (Bogner *et al.* 2007).

Käesoleva magistritöö eesmärk oli uurida Sillamäe prügila metaanilagunduskatte omadusi, kattekihi rajamise tehnoloogia paikapidavust ning kattekihi tõhusust metaani lagundamisel.

Sillamäe prügila metaanilagunduskatteks vajalik orgaaniline ja mineraalne materjal saadi olmejäätmete mehaanilis-bioloogilise töötlemise (MBT) teel. Sulgemistööde käigus kaeti

prügila sinna aastate jooksul ladustatud MBT peenfraktsioonist moodustatud kattekihiga. Metaanilagunduskate, mis soodustab metaani mikrobioloogilist lagundamist ning aitab vältida metaani emissiooni, rajati Huber-Humer *et al.* (2008) soovitude järgi ning kooskõlas Sillamäe linnavalitsuse nõuetega (Sillamäe ..., 2013).

Käesoleva magistritöö uurimisülesanneteks on:

- teha kindlaks prügila pinnalt lenduva prügilagaasi koostis ja jaotumine üle kogu prügila;
- jälgida gaasikoostise muutumist ajast;
- tuvastada prügilagaasi olemasolu kattekihi sees;
- hinnata metaani lagunemist kattekihi läbilõikes;
- uurida katematerjali omadusi;
- kontrollida kattekihi konstruktsiooni vastavust projektile.

Püstitatud uurimisülesannete lahendamiseks viidi 28.06.2017–05.05.2018 läbi välitööd, mille käigus mõõdeti gaasi koostist neljal korral prügila pinnalt ning neljal korral gaasi koostist 50 cm sügavusel kattekihis. 3. aprillil 2018 kaevati kattekiht neljas kohas lahti, et analüüsida prügila erinevatest kohtades ja erinevatel sügavustelt kogutud proovide omadusi ja koostist.

Töö autor soovib tänada oma juhendajaid Mait Kriipsalu ja Valdo Kuusemetsa, nende pühendatud aja ja abistavate nõuannete ning soovitude eest. Samuti tänab autor Ottar Tamme mõõtmistulemuste visualiseerimise eest, Kaja Orupõldu pinnaseproovide analüüsimise eest, Sillamäe Linnavalitsust mõistva suhtumise ja koostöö eest, Uikala prügila personali tehnilise abi eest, Kobras AS-i tööjooniste ja selgituste eest, Haridus- ja Teadusministeeriumit Eesti Maaülikooli teadusteema „Ringmajanduse põhimõtete rakendamine prügilaisse ladestatud ressursi kasutuselevõtuks materjali ja energiana ning stabiliseeritud peenfraktsiooni kasutamine kasvuhoonegaase lagundava kattekihi moodustamiseks“ rahastamise eest ning Terjet, Triinu ja Oksanat abi eest mõõtmiste teostamisel.

# 1. TEOREETILINE ÜLEVAADE

## 1.1. Prügilagaas

### 1.1.1. Prügilagaasi keskkonnamõju

Prügilagaas on keskkonnale kahjulik kasvuhoonegaas, mis on inimtegevuse tulemuseks. 2004. aastal moodustas metaan 14,3% inimtekkelisest kasvuhoonegaaside heitekogusest (IPCC 2007) ning prügilagaas on selle üks peamine osa. 2010. aastal läbi viidud kasvuhoonegaaside heitekoguste uuringu kohaselt on prügilad 16,2% kolmandad inimtekkelise metaani allikad USA-s (USEPA 2012).

Prügis sisalduv orgaaniline aine hakkab kohe pärast ladestamist aeglaselt lagunema. Selle protsessi tulemusena tekib valdavas osas metaani ja süsihappegaasi segu, mida nimetatakse prügilagaasiks (Oonk 2010). Tabelis 1.1 on toodud prügilagaasi koostis.

**Tabel 1.1.** Prügilagaasi koostis (Cheremisinoff 2003)

Koostisosa	Ulatus	Keskmine sisaldus
Metaan (CH <sub>4</sub> )	35–60%	50%
Süsihappegaas (CO <sub>2</sub> )	35–55%	45%
Lämmastik (N <sub>2</sub> )	0–20%	5%
Hapnik (O <sub>2</sub> )	0–2,5%	< 1%
Vesiniksulfiid, divesiniksulfiid (H <sub>2</sub> S)	0,0001–0,17%	0,0021%
Halogeniidid	na	132
Veeaur (H <sub>2</sub> O)	1–10%	na
Mitmesugused muud metaani mittesisaldavad orgaanilised ühendid (NMOCs)	0,0237–1,4294%	0,27%

\* na – ei ole määratud (not available)

Metaan ja süsihappegaas on mõlemad kasvuhoonegaasid. Metaan võib tekkida inimtegevuse käigus (kivisöe kaevandamine, põllumajandus, prügi ladestamine, maagaasi tootmine, reovee puhastamine), kuid seda võib tekkida ka looduses märgalades (IPCC 2007). Võrreldes teiste inimtekkeliste metaaniallikega võib prügilaid käsitleda pigem



punktreostusallikatena, nn suletud süsteemina, kus on võimalik gaasiemissiooni paremini kontrollida (Bogner *et al.* 1997).

Metaan on kergestisüttiv värvitu ja lõhnatu gaas ning võib plahvatada alates 5% kontsentratsiooni juures õhus (Cheremisinooff 2003). Metaan on kasvuhoonegaasidest probleemseim, kuna see püsib atmosfääris umbes 8,4 aastat ning selle globaalse soojenemise potentsiaal on 28 korda suurem kui süsihappegaasil (Solomon *et al.* 2007, IPCC 2013).

Süsihappegaas on samuti värvitu ja lõhnatu gaas, mis satub atmosfääri peamiselt inimtegevuse tõttu. Süsihappegaasi emissioon hakkas hüppeliselt suurenema pärast tööstusrevolutsiooni algust 19. sajandil. Ameerika Ühendriikide Keskkonnakaitseagentuuri 2016. aasta andmete kohaselt moodustas süsihappegaas 81,6% inimtekkelisest kasvuhoonegaaside emissioonidest USA-s (USEPA 2018).

### **1.1.2. Prügilagaasi tekkimine**

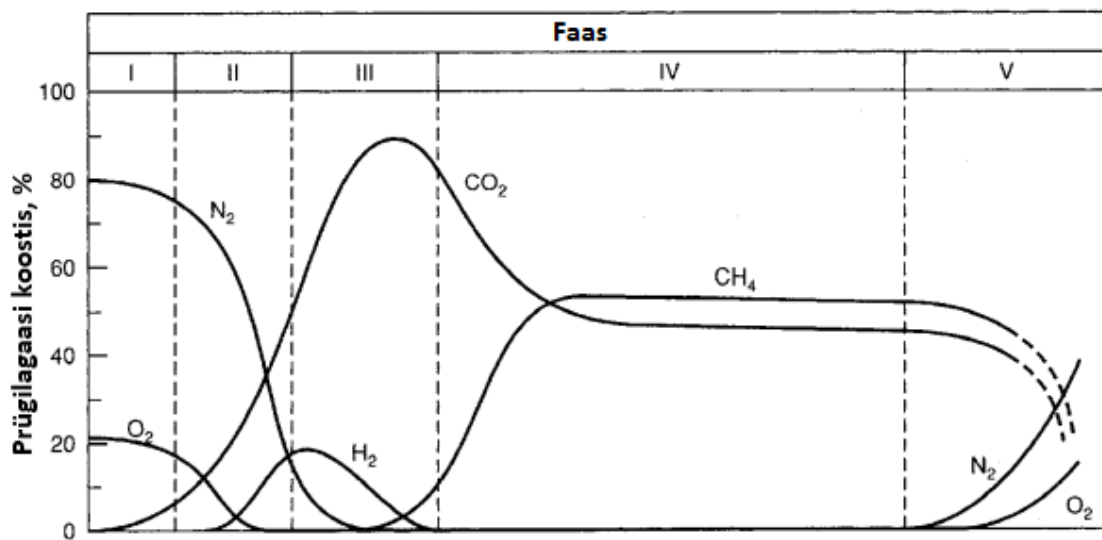
Gaasi tekkimine kulgeb igas prügilas ise moodi, mis sõltub prügila kohaspetsiifilistest tingimustest (Kjeld 2013):

- jäätmete tüüp ja kogus;
- jäätmete orgaanilise aine sisaldus;
- jäätmete vanus;
- prügi ladestamise tehnoloogia ja katmisviis;
- asukoha meteoroloogilised tingimused (sademed, atmosfäärirõhk, pH ja temperatuur).

Prügilagaasi koostis muutub ajas ja sõltub seega prügila vanusest. Prügilagaasi peamiste komponentide tekkimine ajas on jaotatav viide faasi (Tchobanoglous & Kreith 2002, Kriipsalu *et al.* 2016) (joonis 1.1):

- esimeses ehk algfaasis algab jäätmete ladestamise ajal ja vahetult selle järgselt nende bioloogiline lagunemine. Lagunemine toimub aeroobsetes tingimustes, kuna õhk jääb jäätmete ladestamise ajal jäätmete vahele;
- teises ehk siirdefaasis hakkab hapnikusisaldus prügilademes vähenema ning aeroobne keskkond muutub anaeroobseks;

- kolmandas ehk happelise anaeroobse hüdrolyüsi faasis, kiireneb eelmises faasis tekkinud bakterite aktiivsus, tänu orgaaniliste hapete olemasolule ja vesiniku vähenemisele;
- neljandas ehk metaankäärimisfaasis saavutavad mikroobide seas ülekaalu metanogeenid, mis anaeroobse lagundamise käigus toodavad metaani. Need bakterid oksüdeerivad kolmandas faasis tekkinud happed ja vesiniku metaaniks ja süsihappegaasiks;
- viiendas ehk stabiilses faasis on orgaaniline materjal muudetud metaaniks ja süsihappegaasiks. Selles faasis lenduvad tekkinud gaasid atmosfääri või kasutatakse mikroorganismide poolt energiaallikana. Aastate jooksul vähenevad tekkiva prügilagaasi kogused märgatavalt.



**Joonis 1.1.** Prügilagaasi koostis prügila olelusringi vältel (Tchobanoglous & Kreith 2002).

Rettemberger (2005) iseloomustab prügilagaasi teket, aga üheksas faasis. Tema teooria kohaselt kuuendas ehk õhu läbitungimise faasis saab hapnik tungida sügavamatesse kihtidesse, kuna gaasiemissioonid on vähenenud ning protsess hakkab muutuma aeroobseks. Seitsmendas ehk metaani oksüdeerimisfaasis tarbivad mikroorganismid metaani ära. Kaheksandas ehk süsihappegaasi faasis on saavutatud peaaegu täielikult aeroobne keskkond, süsihappegaasi kontsentratsioon on madal. Üheksandas ehk õhu faasis on prügila muutnud mitteaktiivseks, pinnase gaasid on võrdväärset looduslike pinnastega.

## **1.2. Prügilagaasi emissioonide leevendamine**

Prügilagaasi heitekoguseid vähendatakse kahel moel. Esiteks võib gaasi kokku koguda ja kasutada energia tootmiseks või lihtsalt ära põletada. Teiseks võib gaasi tekkimist ennetada või piirata, võttes jäätmetes olev orgaaniline aine ladestamise asemel taaskasutusse kompostides või põletades (Abushammala et al. 2014).

Paljudesse kaasaegsetesse prügilatesse on rajatud gaasikogumissüsteemid, mille abil gaas kogutakse ning kasutatakse energia tootmiseks või põletatakse lihtsalt ära, kui metaani kontsentratsioon on liiga madal (IPCC 2007, Kjeld 2013). Kasutatakse horisontaalseid või vertikaalseid gaasikogumissüsteeme. Sellised süsteemid võimaldavad kokku koguda siiski vaid osa tekkivast gaasist, kuna kogumissüsteemides esineb tihtipeale lekkeid või lendub prügilagaas mööda pinnaselõhesid liikudes atmosfääri (Börjesson et al. 2007, Scheutz et al. 2009).

Väiksemates ja vanemates prügilates lendub prügilagaas atmosfääri, kuna seda tekib taaskasutamiseks või põletamiseks liiga vähe (Huber-Humer et al. 2009). Ühe alternatiivse lahendusena on viimastel aastatel tunnustust saanud meetod, mille eesmärgiks on gaasi oksüdeerimine kohapeal prügila kattekihis. Selleks tuleb aga kattekiht rajad viisil, mis parandaks metanotroofsete bakterite elukeskkonda (Gebert and Gröngröft, 2006, Huber-Humer et al. 2009, Chanton et al. 2011, Scheutz et al. 2009).

Sellist kattekihti kutsutakse metaanilagunduskihiks, bioloogiliselt aktiivseks kattekihiks, bioaktiivseks kattekihiks või ka lihtsalt biofiltriiks (peatükk 1.4.3, joonis 1.4.c), ning seda peetakse prügilate järelhooldusperioodil üheks põhilisemaks leevendusmeetmeks kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamiseks (IPCC 2007).

## **1.3. Seadusnõuded prügilagaasi käitlemisel**

Euroopa Liidu (EL) nõukogu direktiiv 1999/31/EÜ prügilate kohta (1999) sätestab, et prügilagaasi tuleb koguda kõikidest prügilatest, mis võtavad või on võtnud vastu biolagunevaid jäätmeid. Kokku kogutud prügilagaas tuleb töödelda ja kasutada või ära põletada, kui seda pole võimalik kasutada energiatootmiseks. Prügilagaasi tuleb koguda,

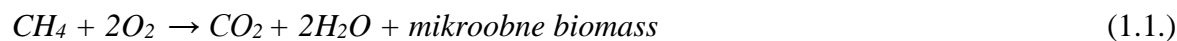
töödelda ja kasutada selliselt, et see ei põhjustaks keskkonnaseisundi halvenemist ega ohtu inimesele. Seetõttu tuleb prügila valdajal tegeleda prügilagaasiga kogu seireperioodi jooksul.

Prügila jäätmelademe katmise nõuded kirjeldatakse määruses nr 38 (Prügila rajamise... 2004, § 35 lg 1). Tavajäätmeprügilas on kohustuslik rajada gaasi kogumise kiht, vettpidav mineraalkiht, vähemalt 0,5 m paksune drenikiht ja vähemalt 1 m paksune kattepinna kiht. Prügila rajamisel, kasutamisel, sulgemisel ja järelhooldel perioodil tuleb vältida või vähendada prügilagaasi sattumist atmosfääri (Prügila rajamise... 2004, § 35 lg 1 p 2). Seega on prügilagaasi kogumine ja käitlemine vajalik kogu prügila olelusringi vältel ning prügila sulgemisele järgneval hooldusperioodil. Kuidas seda tehakse, sõltub aga tavaliselt prügila haldajast. Määruses ei ole toodud arvvaartusi gaasi kontsentratsiooni ega hulga kohta. Bioaktiivset kattekihti määrustes ei käsitleta, kuid sellise tehnoloogia abil on Eestis kaetud mitu prügilat (Kudjape, Adiste, Sillamäe).

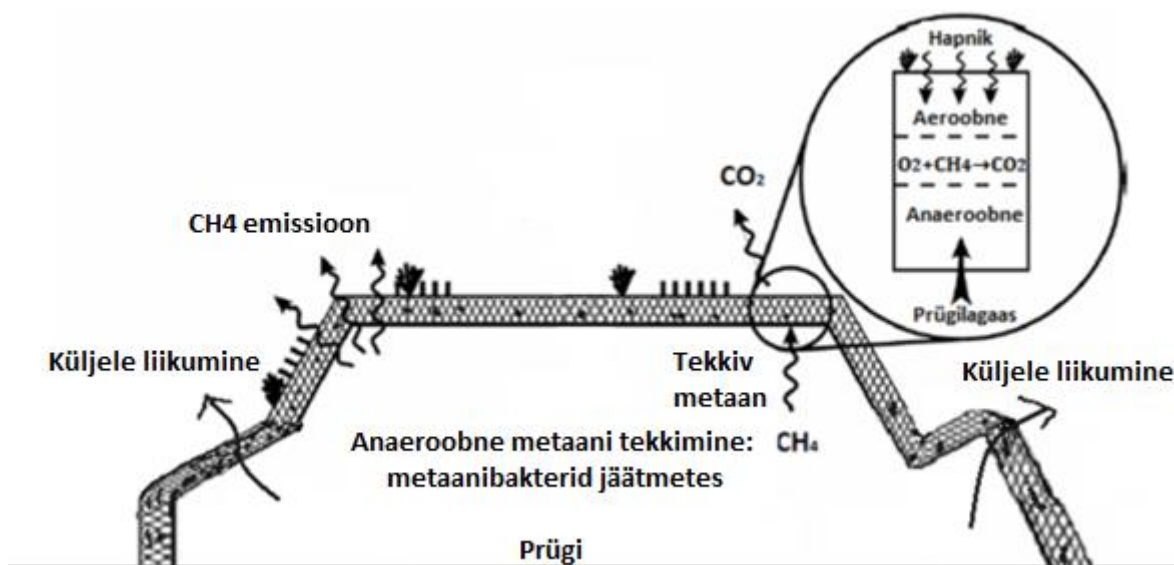
## **1.4. Metaanilagunduskate**

### **1.4.1. Metaani bioloogiline lagundamine**

Metaani bioloogiline lagundamine toimub metanotroofide abil paljudes looduslikes süsteemides ja muldades ilma inimese sekkumiseta (Abushammala et al. 2014). Metanotroofid on aeroobsed bakterid, kes suudavad metaani oksüdeerida looduslikes tingimustes süsihappegaasiks (CO<sub>2</sub>), veeks (H<sub>2</sub>O) ja mikroobseks biomassiks (energia) (Abushammala et al. 2014) (valem 1.1):



Metaani oksüdeerivad populatsioonid tekivad tavaliselt keskkondades, kus kohtuvad aeroobne ja anaeroobne süsteem (Huber-Humer 2004). Selline olukord tekib ka prügilas, kus anaeroobsetes tingimustes moodustunud metaan liigub lademest kattekihti ja jõuab selle hapnikku sisaldavasse ülakihti (joonis 1.2).



**Joonis 1.2.** Metaanilagunduskatte põhimõtteskeem (Scheutz *et al.* 2009).

Metaani bioloogiliseks lagundamiseks prügila pealiskihis, tuleb luua metanotroofidele sobivad elutingimused (Huber-Humer 2004, Lou *et al.* 2011). Metaani bioloogiline lagundamine on uudne lahendus prügilates tekkiva haisu ja metaani samaaegseks kontrollimiseks (Huber-Humer *et al.* 2009, Czyrnek-Delêtre *et al.* 2012).

#### 1.4.2. Metaanilagunduskihi tõhusus

Metaanilagunduskatte tõhusus oleneb materjali enese omadustest, keskkonnatingimustest ja ehitamise korrektsusest. Katte materjalina on kasutatud komposti, mulda, jäätmeid või nende segusid. Kasutatud on olmejäätmetekomposti (Einola *et al.* 2009, Huber-Humer *et al.* 2009), haljastujäätmete komposti (Stern *et al.* 2007, Mei *et al.* 2015), reoveesetekomposti (Börjesson *et al.* 1998, Huber-Humer *et al.* 2011, Hrad *et al.* 2012), prügilast kaevandatud peenfraktsiooni (Wang *et al.* 2011, Jain *et al.* 2013, Pehme 2013) või erinevate materjalide segusid (Einola *et al.* 2009, Lu *et al.* 2011).

Laboratoorse uuringuga on tõestatud, et kompost annab kattekihile head omadused metaani oksüdeerimiseks ning lagundamine toimub tunduvalt kiiremini kui looduslike muldade puhul (Humer & Lechner 2001).

Metaani lagundamine sõltub suuresti kattematerjali keemilistest ja füüsikalistest omadustest, metaani kontsentratsioonist pinnases ning muutub aastaegade vaheldudes (Abushammala

et al. 2013, Einola et al. 2007). Metaani oksüdatsioon mõjutavad tegurid on mulla tekstuur, temperatuur, mulla niiskusesisaldus, elektrijuhtivus, hapnikutarve, prügilademe seisund, pH ja toitained. Sellest saab järeldada, et metaani oksüdatsioonikiirus on kliimatingimustest sõltuv (Scheutz *et al.* 2009). Seega on arusaadav, kuidas paljudes uuringutes on saadud erinevaid väärtusi metaani lagundamise efektiivsuse kohta.

Laboratoorsed ja väliuuringud on tõestanud, et metaani oksüdatsioonivõimekus võib olla vahemikus 0–100% (Jugnia et al. 2008). Stern et al. (2007) sai biokatte maksimaalseks metaani lagundusmääraks 64%.

Albanna et al. (2007) uuringus selgus, et metaani oksüdatsioonikiirus tõusis 29%-lt 35%-ni, kui pinnase paksus suurenes 5 cm võrra (15-lt 20 cm-ni). Samas uuringus tõsteti pinnase niiskusesisaldust 15% -lt 30% -ni, millega tõusis metaani oksüdatsioonimäär 34%-lt 38%-ni.

Cao & Staszewska (2013) on väitnud, et metaani lagundamise võimet võib vähendada liiga niiske kattematerjal, kuid sama efekt võib avalduda ka juhul, kui pinnas on liiga kuiv. Wang *et al.* (2011) uuringus selgus, et metaani oksüdeerumiseks on sobivaim niiskusevahemik 10–30% ning oksüdeerumine hakkas vähenema, kui niiskus oli üle 70%. Zhang et al. (2015) laborikatses selgus, et oksüdatsioonikiirus suurenes märkimisväärselt pärast niiskusesisalduse ja temperatuuri tõusu, vastavalt 18% -lt 30% -ni ja 4-lt 35 °C-ni.

Stern *et al.* (2007), uuringus kasutati katsetes aiakomposti, kus samuti selgus, et metaani oksüdeerumise efektiivsus sõltub niiskuse sisaldusest mullas. Mida suurem oli kattematerjali niiskus, seda väiksem oli metaani lagundamise võime pinnases. Soovituslik niiskuse sisaldus on 30–50% (tabel 1.2).

Metaani oksüdatsioon on bioloogiline reaktsioon, kus temperatuur mõjutab suurel määral metanotroofide mikroobset käitumist ja oksüdatsioonivõimet (Scheutz et al. 2009). Mitmed uuringud on keskendunud temperatuuri mõjule metaani oksüdatsioonile, kus on selgunud, et optimaalne pinnase temperatuur metaani lagundamiseks on 25–35 °C (Christophersen *et al.* 2000, Scheutz & Kjeldsen 2004, Einola *et al.* 2007).

Kattematerjali soovituslik pH on vahemikus 6,5–8,5 (tabel 1.2). Scheutz & Kjeldsen (2004) Taanis läbi viidud uuringust selgus, et metaani oksüdeerimiseks on optimaalne pH 6,9.

Prügila kattekihi juures on oluline jälgida kasutatava materjali küpsust, mida on võimalik hinnata hapnikutarbe järgi (Scheutz *et al.* 2011). Materjali küpsus tähendab seda, et selles ei

tohi olla teiste mikroorganismide ülekaalu, kes hapniku ära tarbivad ning muudavad kattekihi enda anaeroobseks, kuna metanotroofidel on metaani oksüdatsiooniks vaja hapniku. Soovitav 7-päeva hapnikutarve peaks olema väiksem kui 8 mg O<sub>2</sub>/g kuivaine kohta (tabel 1.2).

Elektrijuhtivuse mõju metaani oksüdeerimisvõimele prügila kattekihis on vähe uuritud. Huber-Humer et al. (2011) uuringus selgus, et mida madalam on elektrijuhtivus, seda tõhusam on metaani oksüdeerumine. Kattematerjali hapnikutarbe mõõtmisel märgati, et hapnikutarve on omakorda sõltuv elektrijuhtivusest. Huber-Humer et al. (2009) soovitusel on maksimaalseks elektrijuhtivuse väärtuseks 4000 µS/cm (tabel 1.2).

Seega võib öelda, et metanotroofidele sobivat elukeskkonna (kattekihi) omadused peaks vastama tabelis 1.2. kirjeldatud väärtustele (Huber-Humer *et al.* 2009).

**Tabel 1.2.** Prügila kattekihi soovituslikud omadused (Huber-Humer *et al.* 2009).

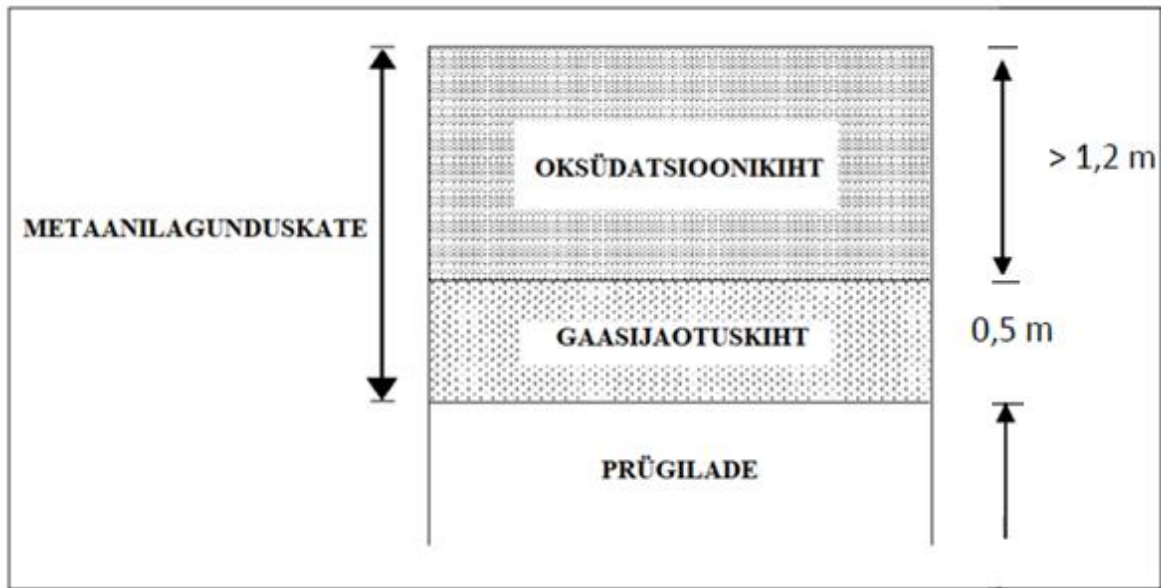
Parameeter	Ühik	Soovitav väärtus
Niiskus	%	30–50
Veehoidmisvõime	% KA	50–130
Elektrijuhtivus	µS/cm	<4000
pH väärtus	-	6,5–8,5
Orgaaniline aine	% KA	>15
Hapnikutarve (7-päeva)	mg O <sub>2</sub> /g KA	≤8

\*KA – kuivaine

### 1.4.3. Metaanilagunduskihi konstruktsioon

Prügilates kasutatakse metaani bioloogiliseks lagundamiseks mitmesuguse konstruktsiooniga biofiltreid: üle kogu prügila ulatuvaid biofiltreid ning väiksemad bioaknaid ja biokatteid. Neid on uurinud paljud teadlased (Abushammala et al. 2014, Huber-Humer et al. 2008, Kim et al. 2013, Lee et al. 2014, Moon et al. 2014). Kõige üldisemas mõistes koosneb biofilter jäätmekihil asuvast gaasijaotuskihist ja sellel lasuvast oksüdatsioonikihist (Abushammala et al. 2014).

Metaanilagunduskiht koosneb oksüdatsioonikihist ja gaasijaotuskihist (Humer & Lechner. 2001, Kriipsalu *et al.* 2016)(joonis 1.3). Oksüdatsioonikiht peab olema soodsaks elukeskkonnaks metaani oksüdeerivatele bakteritele ning gaasijaotuskihi ülesandeks on ühtlustada gaasi juurdevoolu (Huber-Humer *et al.* 2009). Oksüdatsioonikiht peab olema võimalikult ühtlane, selleks et prügilagaas ja sademevesi saaks kihti läbida (Kriipsalu *et al.* 2016).

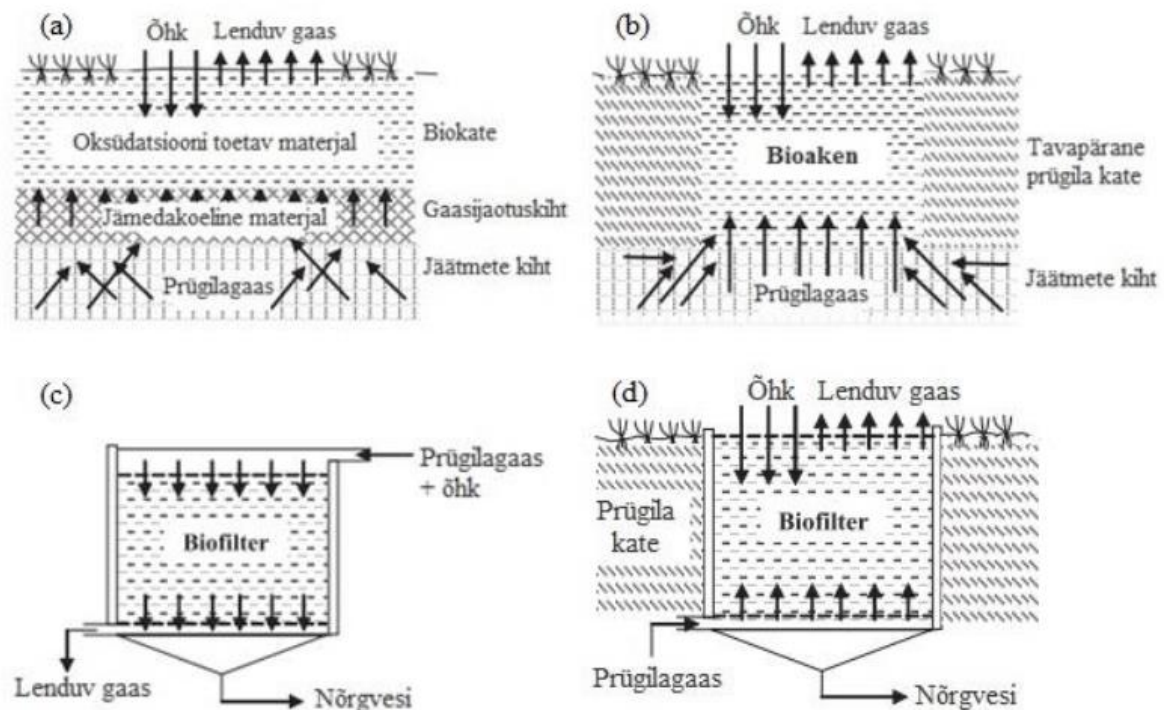


**Joonis 1.3.** Prügila metaanilagunduskatte ehitus (Humer & Lechner 2001).

Biofiltreid saab rajada prügila osana või iseseisva süsteemina, kus filtrid on looduslikest materjalidest. Biofiltersüsteemis saab prügilagaasi suunata ülesvoolu või allavoolu põhimõttel (Huber-Humer *et al.* 2008).

Biokate (joonis 1.4.a) katab kogu prügila või ladestusala. Bioaken (joonis 1.4.b) on suhteliselt väike ning rajatakse prügila kattekihti neisse piirkondadesse, kus metaani emissioon on suurem (Abushammala *et al.* 2014). Eraldi rajatud biofilter (joonis 1.4.c) on mõeldud prügilast välja pumbatud gaasi lagundamiseks. Integreeritud ehk sisse-ehitatud biofilter (joonis 1.4.d) on mõeldud vee- ja gaasitiheda kattekihi sisse.





**Joonis 1.4.** Metaani bioloogilise lagundamise meetodid: biokate (a), bioaken (b), eraldiseisev allavoolu põhimõttel toimiv biofilter (c) ja prügila kattekihti integreeritud ülesvoolu põhimõttel toimiv biofilter (d) (Huber-Humer *et al.* 2014, ref Heinsoo 2016).

## 1.5. Prügilagaasi seire ja mõõtmine

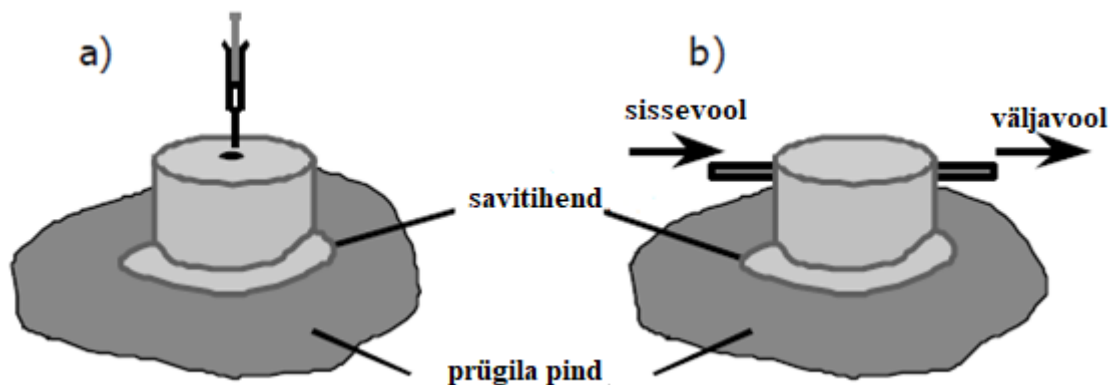
Suletud prügilate järelhoolduse ja seire kohustus on määratletud keskkonnaministri 29.04.2004 määruses nr 38 “Prügila rajamise, kasutamise ja sulgemise nõuded”. Selle kohaselt tuleb prügila järelhoolduseperioodil iga 6 kuu tagant kindlaks teha prügilagaasi heitekogused, koostis ja rõhk ning kontrollida regulaarselt gaasieemaldussüsteemi tõhusust (Prügila rajamise... 2004, § 46).

Metaani emissiooni mõõtmiseks on välja töötatud mitmesuguseid meetodeid (Scheutz *et al.* 2009). Kaks kõige levinumat meetodit on staatiline ja dünaamiline kambermeetod (joonis 1.5).

Esimese puhul tekitatakse pinnasele suletud ruum (nn kamber), kust kindla aja möödudes mõõdetakse metaani kontsentratsiooni (joonis 1.5.a) (Barlaz *et al.* 2004, Christophersen *et al.* 2001, Scheutz *et al.* 2011). Meetod sobib esmaseks gaasiseireks, et selgitada

potentsiaalselt lekkekohad pinnases. Ühes prügilas soovitatakse teha 20–30 mõõtmist, kuid arvestama peab suure veaga prügi ebaühtlase koostise tõttu. Ebatäpsuse vähendamiseks tuleb mõõtmisi korrata. Meetodi kasutamine nõuab hoolt ja on töömahukas (Scharff *et al.* 2005). Gaasi hulk väheneb mõõtmise käigus kambri vaba mahust välja pumbatava mahu arvelt.

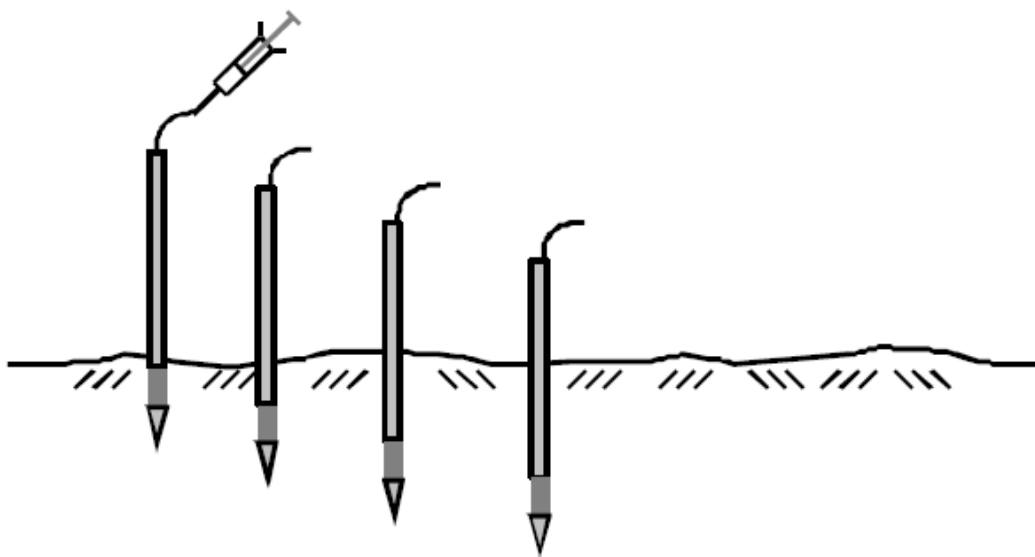
Dünaamiline meetod sarnaneb eelnimetatuga, kuid erineb selle poolest, et sisse- ja väljavooluavade vahel luuakse õhuringlusvool ning gaasi koostist mõõdetakse sisse- ja väljavoolus (joonis 1.5.b) (Scheutz *et al.* 2009). Gaasi hulka ega kontsentratsiooni seega mõõtmise käigus ei vähene.



**Joonis 1.5.** Gaasi emissiooni mõõtmise staatilise (a) ja dünaamilise (b) kambri meetod (Fischer *et al.* 1999).

Kjeldsen *et al.* (1997) leidsid, et 30–60 minuti jooksul peale kambri paigaldamist on metaani emissiooni mõjutavad tegurid muutunud konstantseks ning mõõtmistulemused on siis usaldusväärsed. Heinsoo (2016) uuringus selgus, et 10–20 minuti möödudes on tulemused samuti stabiilsuse saavutanud.

Üheks võimalikuks meetodiks on gaasi koostise mõõtmine prügilasse süvistatud seiretorudest, kus on võimalik mõõta gaaside koostist eri sügavuselt (joonis 1.6). Meetod on lihtne ja odav ning annab õiged tulemused. Kui võrrelda seda suletud kambri meetodiga, siis sageli saadakse suuremad väärtused. Selle põhjuseks võib olla sügavam mõõtetasapind, väiksem lahjendus või ka hapniku tungimine pinnase ülemistesse kihtidesse (Fischer *et al.* 1999, Kriipsalu *et al.* 2006).



**Joonis 1.6.** Gaasi koostise mõõtmine prügilasse süvistatud seiretorudest (Fischer et al. 1999).

Kui on kahtlus, et prügila pinnases olev gaas võib kuskilt lekkida, siis on võimalik kasutada isotoop-mõõtmist, millega saadakse teada, kas osa metaanist oksüdeerub prügila pealmises kihis. Prügila sees on välja kujunenud metaani isotoopide spetsiifiline jaotus, mis erineb välisõhus olevast jaotisest. Kui metaan läbib kattekihi, siis osa sellest oksüdeerub. Prügilagaasi isotoopmõõtmisi on suhteliselt lihtne teha, kuid proovide ettevalmistamine ja analüüsimine on kallis (Scharff et al. 2005).

## 1.6. Sillamäe prügila sulgemine

### 1.6.1. Prügila iseloomustus

Sillamäe prügila asub Ida-Virumaal Narva-Jõesuu linnas (endine Vaivara vald) Vaivara külas. Sillamäe prügila asub Sillamäe linnast umbes 7 km kaugusel lõuna suunas ligikaudu 5,84 ha suurusel alal (joonis 1.7). Sillamäe prügilasse ladestati jäätmeid aastatel 1979–2009 (Keskkonnaamet 2013). Sillamäe prügilas lõpetati olmejäätmete ladestamise 1. jaanuaril 2008, ning see asendus olmejäätmete mehaanilise-bioloogilise töötlemisega: purustamise, sõelumise ja kompostimisega. MBT tulemusena tekib kaks peamist fraktsiooni: jäätmekütus ja peenfraktsioon. Viimast oli ette nähtud kasutada sulgemistöodel prügikehandi

kattematerjalina (Sillamäe ..., 2013). 2012. aastal lõpetas seda tööd teinud OÜ Ecocleaner Sillamäel oma tegevuse ning MBT peenfraktsioon hunnikud jäid prügila territooriumile alles.

Prügila ladestusala ulatus on umbes 2,4 ha ja prügi ladestu kõrgus ulatub kohati 6 meetrini. (Sillamäe ... 2013).



**Joonis 1.7.** Sillamäe prügila asukoht (Maa-amet 2018).

Sillamäe prügila sulgemise ja korrastamise vajadus tulenes Keskkonnaministri määrusest nr 38 „Prügila rajamise, kasutamise ja sulgemise nõuded“ (2004). Nimetatud määruse § 62 lõike 1 kohaselt pidid kõik prügilad, mis jäid tegutsema peale 31. detsembrist 2001, vastama nimetatud määruse nõuetele või olema jäätmete ladestamiseks suletud 16. juuliks 2009. Sama määruse § 62 lõike 2 kohaselt pidid kõik prügilad, mis suleti jäätmete ladestamiseks 16. juuliks 2009, olema korrastatud nimetatud määruse § 39 – 42 sätestatud korras hiljemalt 16. juuliks 2013. Sillamäe prügila sulgemistööd algasid aastal 2010.

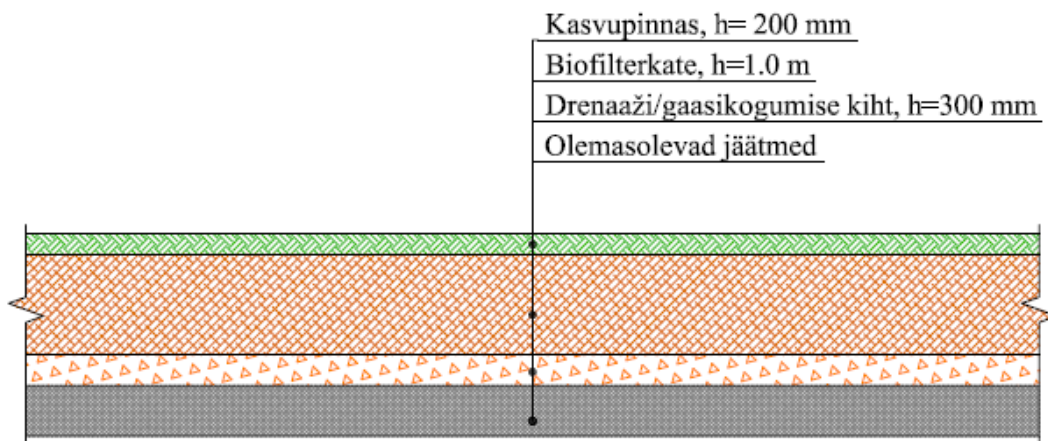
### **1.6.2. Prügilale kuju andmine**

2008. aastal AS Kommunaalprojekti poolt koostatud Sillamäe prügilale sulgemisprojekti oli prügilale katmisel ette nähtud kasutada MBT peenfraktsiooni. Sillamäe linna ja Keskkonnaameti koostöös muudeti esialgset sulgemisprojekti. 2013. aastal Kobras AS poolt korrigeeritud tööprojekti kohaselt nähti ette sulgemistööde käik ja tööde järjekord. Esmalt oli vaja teisaldada ettevõtte pankroti tõttu prügilale laoplatsile maha jäänud jäätmed, et prügilale anda sobiv kuju. Bioloogiliselt-mehaaniliselt töödeldud jäätmed kasutati biofilterkate rajamiseks 50% ulatuses ning ülejäänud moodustas sellele lisatud struktuuri ja toitainete sisaldust parandavad materjalid (liiv, kompost ja reoveesete) (Sillamäe prügilale... 2014).

Prügilademele ühtlase kuju andmine on vajalik sademevee äravoolu tagamiseks ning kattekihtidele piisava languse ja tasasusega aluskihi saamiseks. Töötlemata jäänud jäätmed tuli eest ära vedada kuni 15 000 m<sup>3</sup> ulatuses ning hiljem kihtide kaupa tihendades tagasi tuua prügilale kuju andmiseks. Ka kuni 12 800 m<sup>3</sup> biofilterkattes kasutatavaid bioloogiliselt-mehaaniliselt töödeldud jäätmeid tuli esmalt eest ära vedada ning hiljem tagasi tuua kattekihi ülemise osa rajamiseks (Sillamäe prügilale... 2014). Prügilale korrastustööd kestsid 2014. aasta märtsist augustini.

### **1.6.3. Prügilale kattekiht**

Prügilale sulgemisprojekti nähti ette laotada profileeritud ja tasandatud prügilademe peale 300 mm paksune gaasijaotuskiht, seejärel 1 m paksune biofilterkate ning kõige peale 200 mm paksune kasvukiht (joonis 1.8). Biofilterkate pidi olema tehtud huumuserikkast materjalist ( $\geq 3.0\%$ ) (Sillamäe prügilale... 2014). Valitud biofilter-kattekihi konstruktsioonile viitab erialane kirjandus (Huber-Humer et al. 2008, ref Sillamäe ... 2013).



**Joonis 1.8.** Sillamäe prügila kattekihi ristlõige (Sillamäe prügila... 2014).

Prügila peale rajati kolm gaasiseirekaevu, igas kaevus on kuus proovivõtu punkti. Nende kaudu on võimalik mõõta prügilagaasi kontsentratsioone kattekihi eri sügavuses (Sillamäe prügila... 2014).

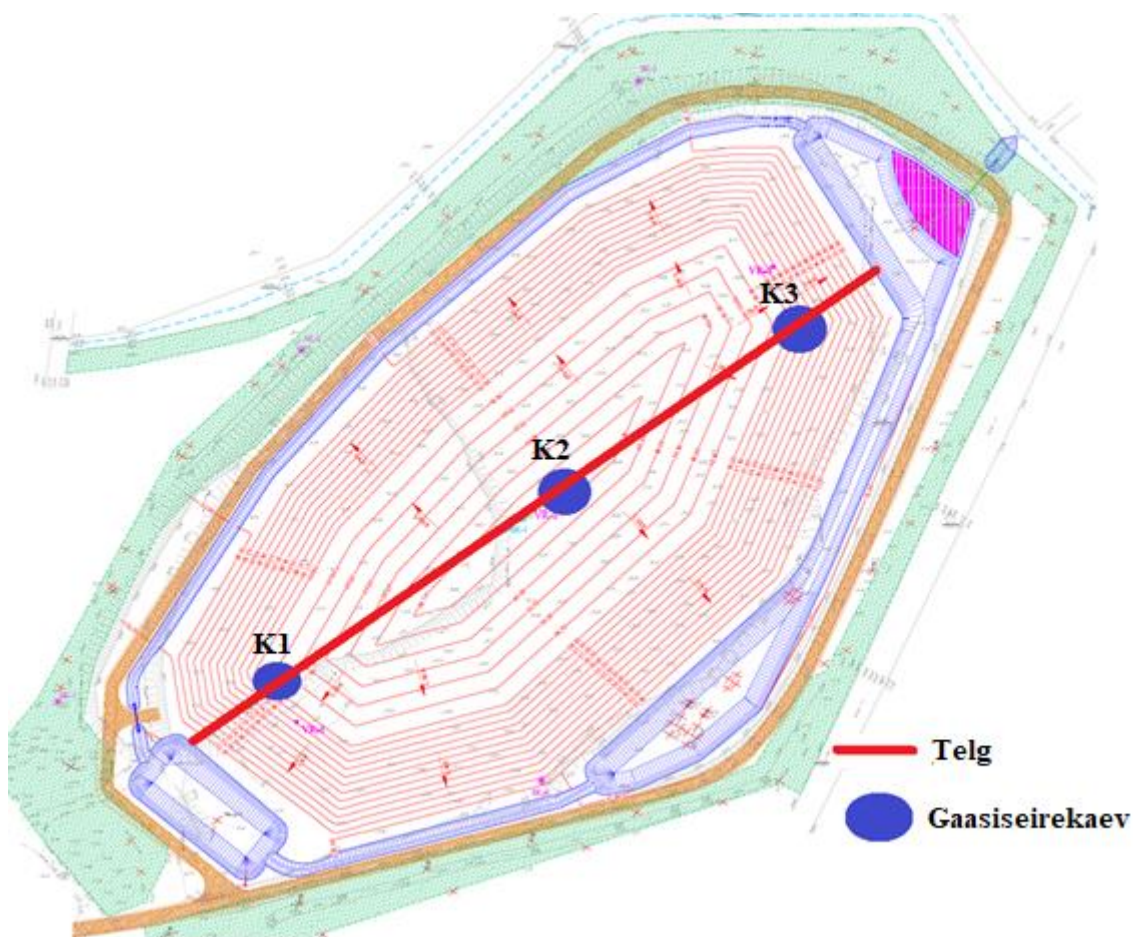
Keskkonnaameti 17. oktoobri 2013 korraldusega „Sillamäe prügila sulgemiskava ja sulgemisotsuse (05.05.2008 nr 32-1-1/5191) muutmine” (Keskkonnaamet 2013) kinnitati muudetud Sillamäe prügila sulgemiskava ning täpsustati seire tingimused. Prügilagaasi seiresammuks määrati 6 kuud ning kontrollitavateks parameetriteks prügilagaasi heitkogused, rõhk ning gaasi koostis, sh metaan, süsihappegaas ja hapnik. Samas ei ole täpsustatud metaanilagunduskatte seiramise või toimimise kindlaks tegemise vajadust. Metaanilagunduskatte tõhususe uurimine valiti käesoleva uurimistöö teemaks.



## 2. MATERJAL JA METOODIKA

### 2.1. Mõõtmispunktide valik

Sillamäe prügila on pikliku kujuga, suunaga edelast kirdesse. Prügila reljeefi iseloomustab joonis 2.1. Prügila tipus on kolm gaasiseirekaevu, läbi nende tõmmati kujutletav telg, et määrata mõõtepunktid sümmeetriliselt kahele poole seda telge (joonis 2.1).



**Joonis 2.1.** Sillamäe prügila reljeef (Sillamäe prügila... 2014).

Mõõtepunktid valiti gaasikaevude lähedusse, tasasele platoole, nõlvadele ja nõlvade alla nii, et need jaotuks ühtlaselt üle kogu prügila. Oluline oli ka mõõtepunktide arv, mis valiti põhimõttel, et mõõtmisi oleks võimalik teostada ühe päevaga.

Kuna prügila ladestusala pindala on 2,4 ha, siis maastikul mõõtepunktide valik osutus keerukamaks kui esialgu plaaniti. Töö käigus lisati mõõtepunkte piirkondadesse, kus tekkis gaasilekke kahtlus (näiteks taimkatte puudumine). Mõõtmistel oli punkte 31–49 ning punktid määrati lähtudes eelmises lõigus kirjeldatud põhimõtetest.

Mõõtmispunktide asukohad määrati enne mõõtmist GPS-iga. Mõõtmispunktid tähistati 50 cm pikkuste puidust lippidega (joonis 2.2).



**Joonis 2.2.** Mõõtmis- ja proovivõtupunktide asukohad prügila kattekihi peal (aluskaart Maammet 2018).

## 2.2. Prügilagaasi mõõtmine prügila pinnalt

Prügilagaasi mõõdeti kokku viiel korral ajavahemikus juuni 2017 kuni mai 2018. Neist neljal korral, 28.06.2017, 03.09.2017, 22.10.2017 ja 05.05.2018, mõõdeti prügilagaasi prügila pinnalt. Gaaside sisaldust mõõdeti 40,7 l plastkasti alt portatiivse gaasianalüsaatoriga Geotechnical Instruments GA5000 (Geotech, Suurbritannia) (joonis 2.3). Mõõtmismeetod



põhineb suletud kambri meetodil (peatükk 1.5.), mida on lihtsustatud ning kohandatud tulenevalt piiratud eelarvest ja kasutustingimustest.



**Joonis 2.3.** Prügilagaasi emissiooni mõõtmine suletudkambri meetodil; autori foto.

Gaasianalüsaator oli uus, kalibreeritud valmistajatehases 2017. aastal. Seadme töötemperatuur on -10 kuni 50 °C, mõõteulatus on CH<sub>4</sub> puhul 0–100%, CO<sub>2</sub> puhul 0–100% ja O<sub>2</sub> puhul 0–25% ning seadme mõõtmistäpsus on toodud tabelis 2.1 (Geotech 2016).

**Tabel 2.1.** Gaasianalüsaatori Geotechnical Instruments GA5000 mõõtmistäpsus (Geotech 2016)

Gaasi osakaal	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
0–70%	±0,5%	-	-
70–100%	±1,5%	-	-
0–60%	-	±0,5%	-
60–100%	-	±1,5%	-
0–25%	-	-	±1,0%

Gaasianalüsaator ühendati põhimõttel, et mõõdetav gaas tõmmatakse kasti alt alumise vooliku kaudu masinasse, analüüsitakse masinas ning juhitakse tagasi kasti alla ülemise vooliku kaudu. Kast suruti maapinnale võimalikult õhutihedalt ning mõõtmisi läbi viiv

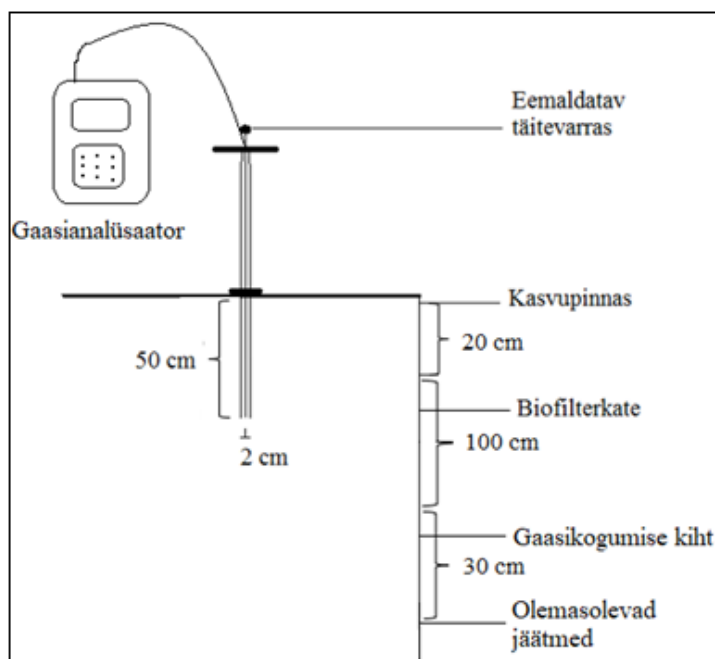
inimene (u 95 kg) istus kastil. Iga kord võeti kaks lugemit: üks kohe, kui kast prügila pinnale seati, ning teine 10 minutit hiljem.

Käesolev uurimistöö meetodika valiti Heinsoo (2016) uurimistöö alusel. Ka mõõteperiood valiti samast tööst, kus selgus, et mõõtetulemused 10 minuti ja 20 minuti möödudes esimese mõõtmise tulemustest oluliselt ei erinenud. Peale iga lugemi võtmist ventileeriti gaasianalüsaator.

### 2.3. Prügilagaasi mõõtmine prügila kattekihi seest

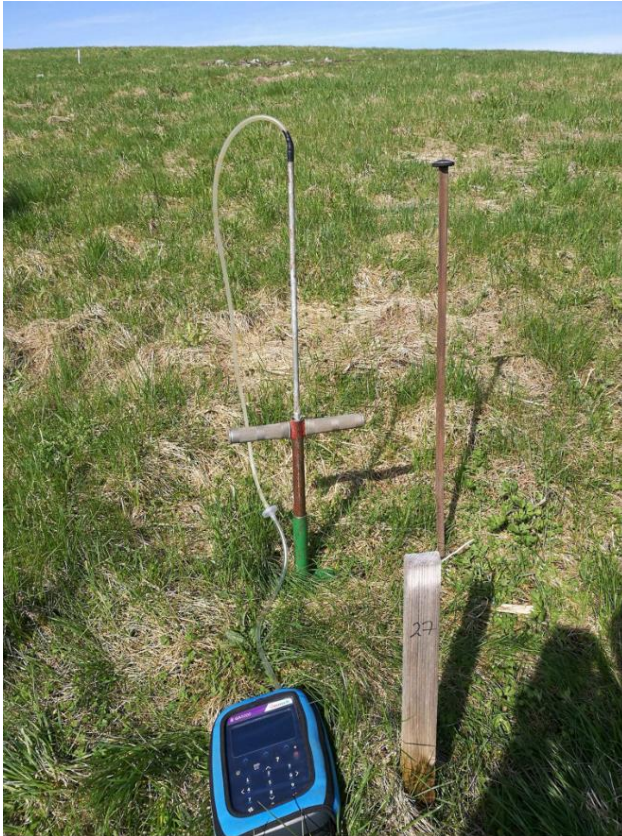
Lisaks prügila pinnalt teostatud mõõtmistele viidi neljal korral läbi mõõtmised prügila kattekihi seest. Alates teisest mõõtmistsüklist 2017. aasta 30. juulil korregeeriti esialgsete mõõtepunktide asukohti ning prügilagaasi hakati mõõtma ka 50 cm sügavusel prügimäe kattekihist. Mõõtmised toimusid 30.07.2017, 02.09.2017, 21.10.2017 ja 04.05.2018.

Mõõtmisteks kasutati 20 mm läbimõõduga puuri, mis suruti igasse mõõtepunkti 50 cm sügavusele. Puur koosneb käepidemest ja fiksaatorist, millega saab teha iga kord täpselt sama sügavusega augu. Puuri sees on monoliitne täitevarras, mis takistab augu puurimisel välisõhu sattumise puurauku ja mille eemaldamisel jõuab gaas torusse puuraugu põhjast (joonis 2.4).



**Joonis 2.4.** Prügilagaasi mõõtmine kattepinna 50 cm sügavuselt.

Pärast täitevarda eemaldamist asetati mõõteauku õhutihedalt roostevabast terasest toru, mis on omakorda ühendatud gaasianalüsaatori voolikuga ja mille kaudu imeti gaas augu põhjast analüsaatorisse (joonis 2.5). Igas mõõtmispunktis teostati üks mõõtmine, kuniks näidud olid stabiliseerunud ning seejärel liiguti edasi järgmisesse mõõtmispunkti.



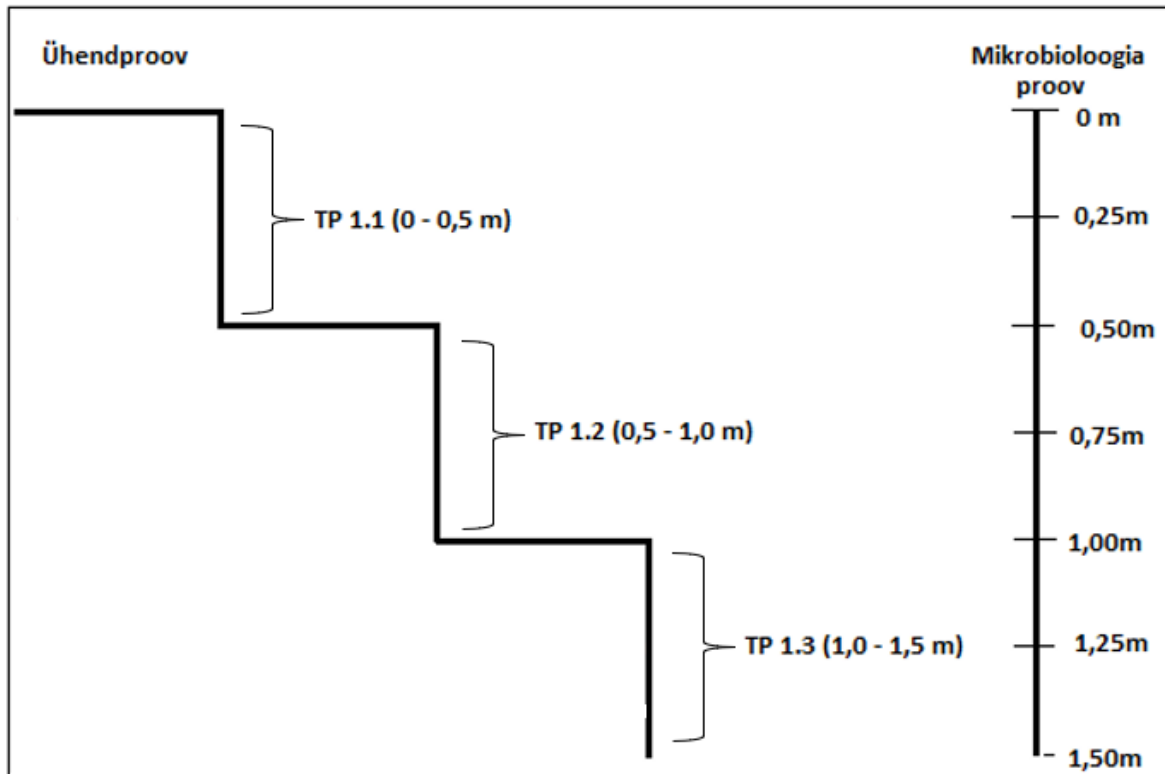
**Joonis 2.5.** Prügilagaasi mõõtmine kattedepinnasest; autori foto.

## **2.4. Pinnaseproovide võtmine**

Sillamäe prügilas toimunud välitööde käigus koguti pinnaseproovid, eesmärgiga võrrelda prügila erinevates kohtades ja erinevatel sügavustel oleva oksüdatsioonikihi omadusi ja koostist. Proovide võtmine Sillamäe prügilast toimus 3. aprillil 2018. Proovide saamiseks tehti neli kaevet (TP1, TP2, TP3 ja TP4), mille asukohad on märgitud joonisel 2.2 punaste ruutudega. Augud kaevati ratastraktori abil.

Igas punktis koguti proovid kolmelt sügavuselt (joonis 2.6) 0,5 m sammuga kuni 1,5 m sügavusele, kust koguti kõigilt sügavusvahemikult 5–7 kg proove. Kokku saadi 12 proovi.

Proovid märgistati kaevepunktide ning sügavuste järgi, kust proov koguti (nt: TP3 (0,5–1m) – kolmanda augu teine tasapind). Proove hoiustati kuni laboratoorsete tööde alustamiseni õhukindlates kottides ning jahedas. Proovide analüüsimisel sõeluti esmalt proovid läbi 25 mm sõela ning läbi 10 mm sõela, jagades nii proovid kolme erineva fraktsiooniga alamprooviks: >25 mm; 10–25 mm ja < 10 mm. Keemilised analüüsid tehti < 10 mm fraktsioonist.



**Joonis 2.6.** Pinnaseproovide kogumise joonis Sillamäe prügilas.

Kõigist neljast kaevest koguti pinnast täiendavalt seitsmelt sügavuselt hilisemateks mikrobioloogilisteks uuringuteks (joonis 2.6). Igalt sügavuselt võeti 0,5–1 kg pinnast (kokku 24 proovi), mis säilitati suletud plastkottides sügavkülmikus. Enne iga järgmise proovi võtmist puhastati kühvlid, et saadavad tulemused ei oleks saastunud eelmise proovi pinnases oleva mikroobikooslusega. Antud töös mikrobioloogiste proovi tulemusi ei käsitleta.

## **2.5. Pinnaseproovidest füüsikalis-keemiliste parameetrite määramine**

Kuivaine sisalduse määramine, elektrijuhtivuse ja pH mõõtmine ning bioloogilise aktiivsuse määramine toimusid Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituudi bio- ja keskkonnakeemia laboris.

### **Kuivaine sisalduse määramine**

Kuivaine sisalduse (KA) määramiseks kuumutati proove 105 °C juures püsiva kaalu saavutamiseni. Iga proovi kuivaine määrati kolmes korduses.

### **Elektrijuhtivuse ja pH mõõtmine**

Elektrijuhtivus ja pH määrati peenfraktsiooni vesi-ekstraktidest, mis saadi 5 grammist proovist ja 50 ml destilleeritud veest loksutades proove tund aega orbitaalloksutil (GFL 3017) kiirusega 140 pööret minutis. Elektrijuhtivus määrati seadmega pH/Cond340i (WTW) ja pH seadmega SevenMulti (Mettler Toledo). Analüüsid teostati kolmes korduses.

### **Niiskuse ja temperatuuri määramine**

Sillamäe kattekihi niiskus määrati kohapeal seadmega FieldScout TDR 300 ja pinnase temperatuur seadmega 6802 II Dual Channel Digital Thermometer.

### **Bioloogilise aktiivsuse määramine**

Sillamäe kattekihist võetud proovide 7-päevane hapnikutarve määrati Oxitop® mõõtesüsteemiga temperatuuril 25°C. Samas määrati ka proovide metaani lagundamise potentsiaal. Selleks inkubeeriti proovid koos metaaniga 25 °C juures ja mõõdeti metaani kontsentratsiooni muutust ajas gaaskromatograafia (CP-4900 Micro-GC, Varian).

## **2.6. Pinnaseproovide sõelumine**

Fraktsioon < 10 mm sõeluti sõeluril Retsch AS 200 basic (joonis 2.7). Kasutusel olid sõelad avasusega 10 mm, 8 mm, 6,3 mm, 4 mm ja 2 mm.



**Joonis 2.7.** Trummelsõelur Retsch AS 200 basic; autori foto.

Masinsõelumisel sõeluti kõiki proove sama intensiivsusega 10 minutit. Seejärel kaaluti kõigi sõelade sisu.

## **2.7. Andmetöötlus ja -analüüs**

Mõõdetud tulemused koondati ja korrastati tabelarvutustarkvaras MS Excel 2016. Mõõtmispunktide asukohakaartide koostamiseks ning mõõtmistulemuste kujutamiseks joonistel kasutati ArcGIS for Desktop tarkvara. Mõõtmispunktide asukohakaartide aluskaardina kasutati Maa-ameti ortofotot (Maa-amet 2018). Mõõtmistulemuste interpoleerimisel kasutati nn loomuliku naabri meetodit (ingl k *natural neighbour*).

Statistiline analüüs teostati tabelarvutustarkvaras MS Excel 2016.

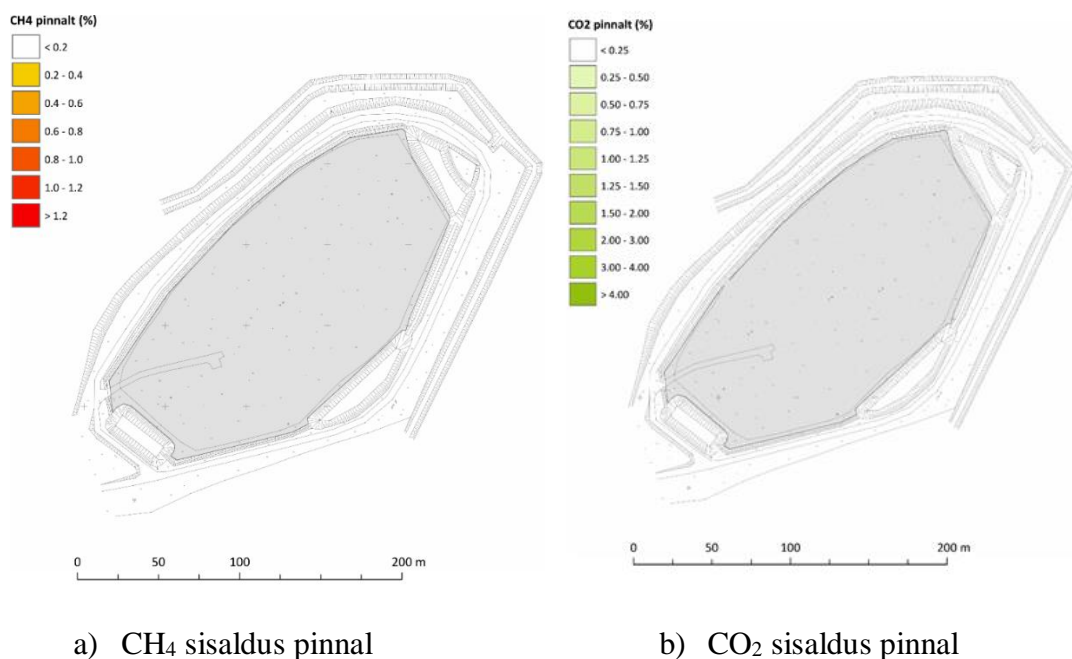


### 3. TULEMUSED JA ARUTELU

#### 3.1. Prügilagaasi emissioonid prügila pinnalt ja kattekihist

##### Esimene mõõtmiskord

Juunis läbi viidud mõõtmistel (33 mõõtmispunkti) selgus, et läbi Sillamäe prügila kattekihist metaani ei lendunud (joonis 3.1a, lisa 2 tabel 2.1). Prügilagaasi näitudes ei olnud muutusi ka pärast 10 minuti möödumist. Süsihappegaasi esines juunis ainult mõõtmispunktis 1, süsihappegaasi mõõdeti nii mõõtmise alguses kui 10 minuti möödudes 0,1%, seega täiendavat emissiooni prügila kattekihist ei toimunud (joonis 3.1b, lisa 2 tabel 2.1). Süsihappegaasi ei esinenud üldse 32 mõõtmispunktis.



**Joonis 3.1.** Metaani ja süsinikdioksiidi sisaldused Sillamäe prügila pinnal 28.06.2017; joonise koostas Ottar Tamm.

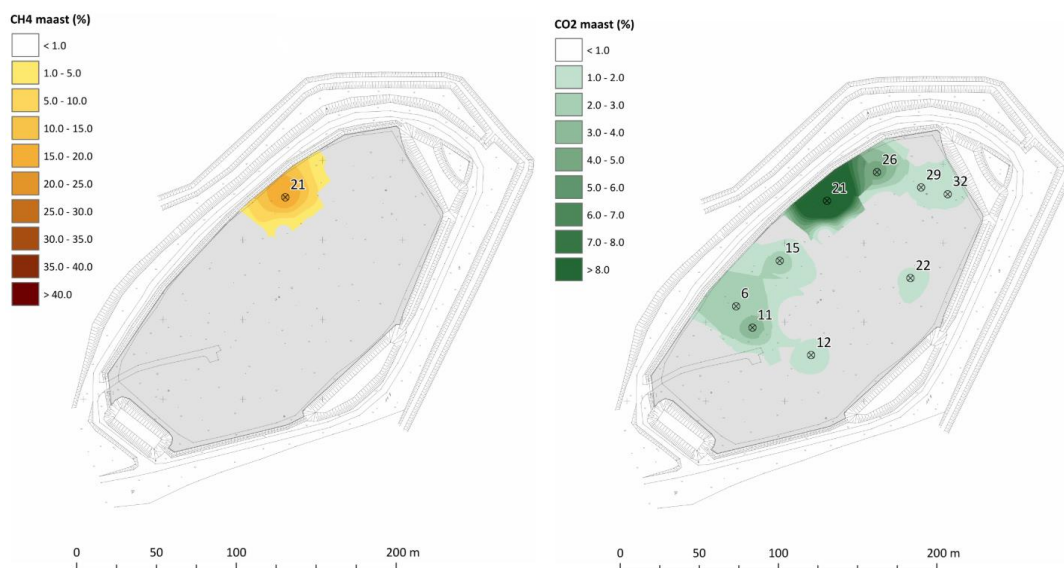
Antud tulemustest sai püstitada kolm hüpoteesi:

- kas mõõtmisstrateegia on vigane;
- metaanilagunduskate toimib ja gaasi ei leki;
- gaas lekib kuskilt mujalt.

Kuna juuni kuu mõõtmistel metaani ei tuvastatud, vahetati mõõtmisstrateegiat ning alustati püstitatud hüpoteeside kontrolliga. Juulis korregeeriti 15 mõõtepunkti asukohta ja mõõdeti prügilagaasi sisaldust 50 cm sügavuselt prügimäe kattekihist, mille eesmärgiks oli tuvastada, kas metaani on prügila sees ja leida potentsiaalsed mõõtmispunktid, kus tuleks mõõtmisi teostada prügila pinnalt.

### Teine mõõtmiskord

2017. aasta juulis teostatud mõõtmised Sillamäe prügilas 50 cm sügavusel kattekihis (31 punkti) näitasid, et metaani esines peamiselt kolmes kohas (joonis 3.2a, lisa 2 tabel 2.2). Suurim tulemus mõõdeti nii metaani kui ka süsihappegaasi puhul punktis P21. Nimetatud punktis mõõdeti metaani sisalduseks 20,2% ja süsihappegaasi sisalduseks 19,9%.



a) CH<sub>4</sub> sisaldus 50 cm sügavusel

b) CO<sub>2</sub> sisaldus 50 cm sügavusel

**Joonis 3.2.** Metaani ja süsinikdioksiidi sisaldused Sillamäe prügilas 30.07.2017; joonise koostas Ottar Tamm.

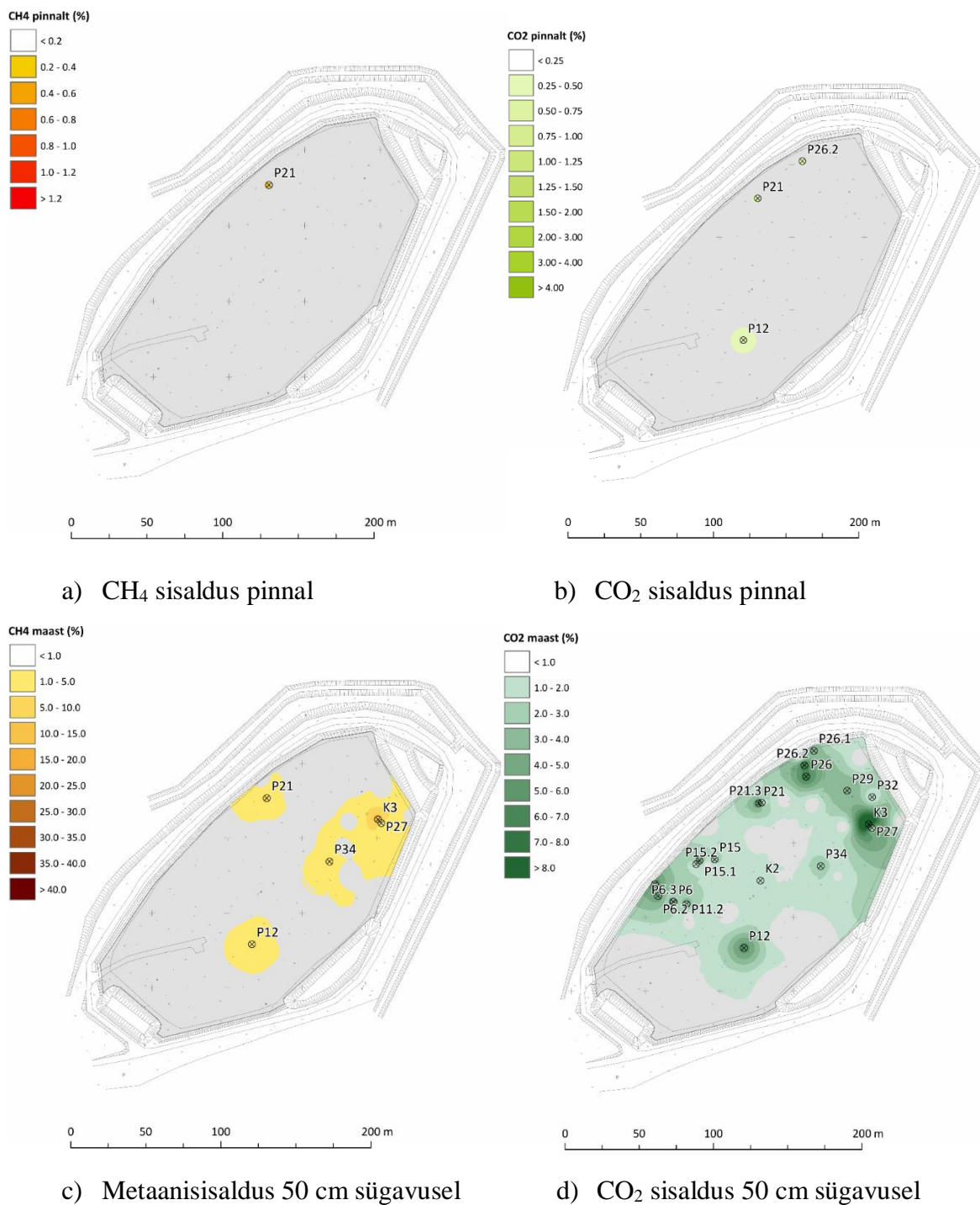
Lisaks esines metaani punktides P14 ja P16 vastavalt 0,9% ja 0,3% ja süsihappegaasi esines kõigis mõõtepunktides: vahemikus 0,1–19,9% (joonis 3.2b, lisa 2 tabel 2.2).

### Kolmas mõõtmiskord

Septembris jätkati mõõtmisi prügila pinnalt ja 50 cm sügavuselt ning lisati juurde 18 mõõtmispunkti (mõõdeti 49 punkti). Prügila pinnalt mõõtes oli metaani emissioone võimalik tuvastada ainult kolmes mõõtepunktis: mäe idapoolsel nõlval punktides P12 ja P34 ning mäe läänepoolsel nõlval punktis P21 (joonis 3.3a, lisa 2 tabel 2.3). Punktides P12, P34 ja P21 mõõtmise alguses metaani ei esinenud, kuid 10 minuti möödudes mõõdeti kahest



esimesest punktist metaani 0,1% ning punktist P2 0,3% ehk 10 minuti jooksul suurenes metaani sisaldus kogunenud gaasis 0,2%. 50 cm sügavusel oli metaani kolmeteistkümnes punktis: vahemikus 0,1–14,9% (joonis 3.3c, lisa 2 tabel 2.4). Märkimisväärsamad tulemused saadi punktides K3 (14,9%) ja P34 (4,7%), nendest punktides ei olnud mõõtmisi varem tehtud. Lisaks esines metaani punktides P12 ja P21 vastavalt 4,7% ja 8%.



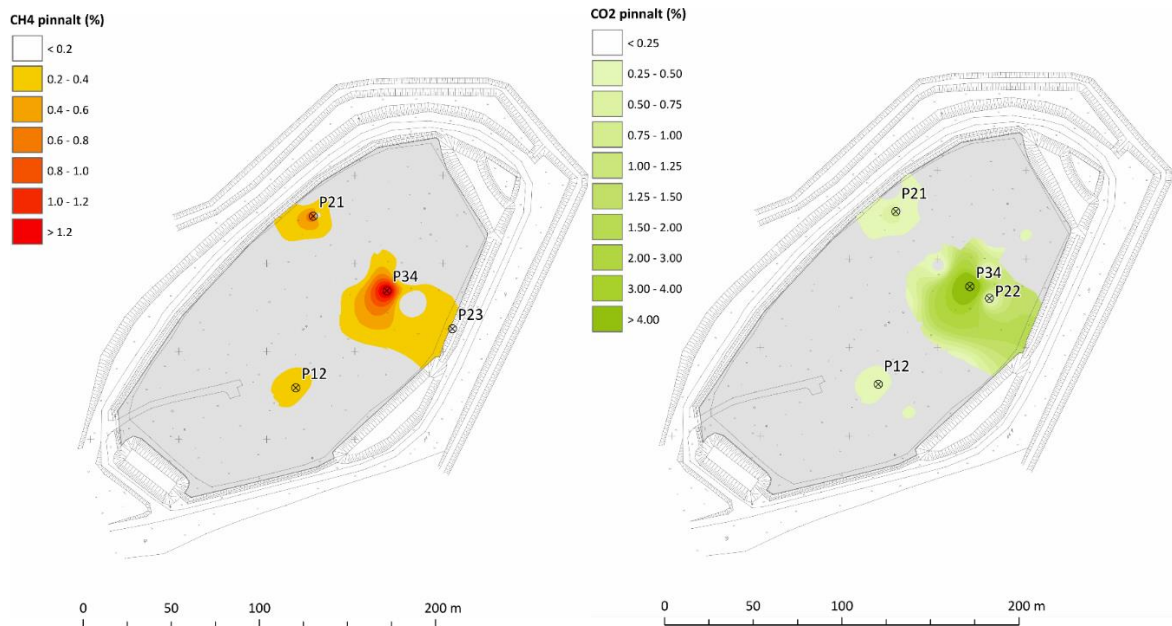
**Joonis 3.3.** Metaani ja süsinikdioksiidi sisaldused Sillamäe prügilas 02.–03.09.2017; joonise koostas Ottar Tamm.

Prügila pinnal oli süsihappegaasi enamikes mõõtmepunktides. 10 minuti jooksul kogunenud gaasis sisaldus süsihappegaasi: vahemikus 0,0–0,4% (joonis 3.3b, lisa 2 tabel 2.3). Kõige enam süsihappegaasi lendus punktides P12, P21 ja P26.2. Kahekümne seitsmest punktist mõõdeti süsihappegaasi nii mõõtmise alguses kui 10 minuti möödudes 0,1%, seega täiendavat emissiooni prügila kattekihhist ei toimunud. Süsihappegaasi ei esinenud üldse seitsmes mõõtmispunktis. 50 cm sügavusel oli süsihappegaasi kõigis punktides vahemikus 0,2–17,6% (joonis 3.3d, lisa 2 tabel 2.4). Suurim tulemus mõõdeti nii metaani kui ka süsihappegaasi puhul punktis K3. Kolmandal mõõtmisel on näha seost, kui pinnases leidub metaani, siis on seal alati ka süsihappegaasi, vastupidist seost ei esine, kuna metaani lagundamise lõpp produktiks on alati süsihappegaas ning kõrgem CO<sub>2</sub> sisaldus on suure tõenäosusega seotud just metaani lagunemisega.

### **Neljas mõõtmiskord**

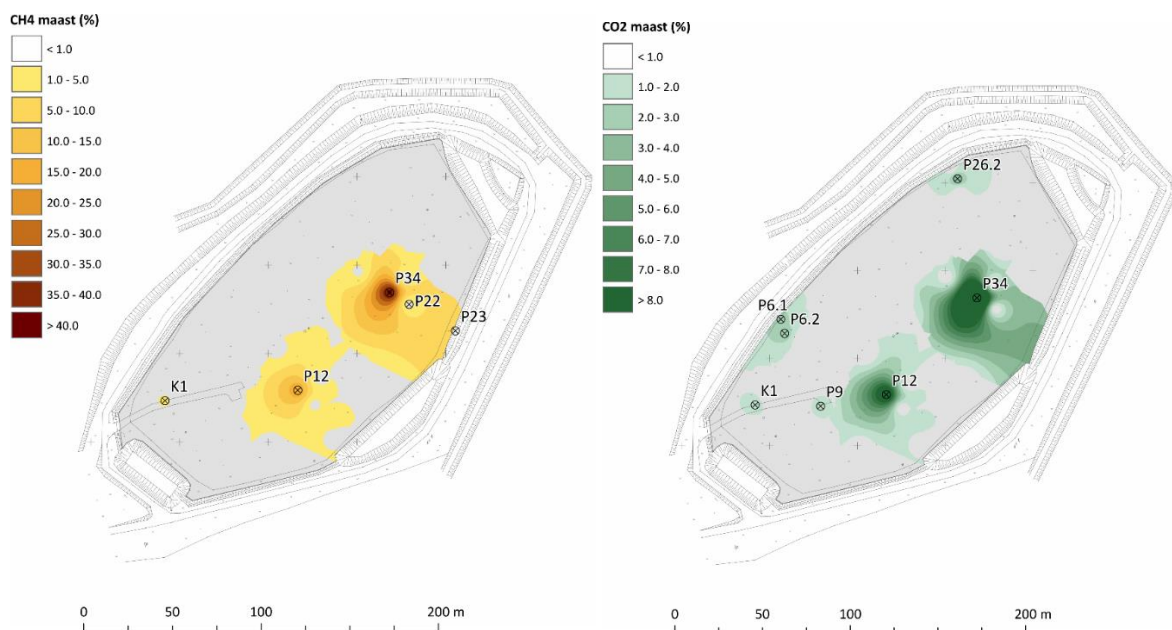
2017. aasta oktoobris tehti mõõtmised taaskord pinnalt ja 50 cm sügavuselt (49 mõõtepunkti). Maa peal leidis metaani ainult seitsmes mõõtmispunktis (P12; P12.1; P12.2; P21; P21.1; P34 ja K3). 10 minuti jooksul kogunenud gaasis sisaldus metaani vahemikus 0,0–1,5% kogu gaasist (joonis 3.4a, lisa 2 tabel 2.6). Kõige enam metaani lendus jälle punktides P12, P21 ja P34, kus metaani sisaldus oli vastavalt 0,4%, 1% ja 1,5%. Punktis P21 esines mõõtmise alguses metaani 0,5%, kuid 10 minuti möödudes mõõdeti metaani 1% ehk 10 minuti jooksul suurenes metaani sisaldus kogunenud gaasis kaks korda. Kattekihi seest saadi metaani kahekümne ühes mõõtmispunktis: vahemikus 0,1–40,9% (joonis 3.4c, lisa 2 tabel 2.5). Kõige enam metaani oli taaskord punktides P34 ja P12. Nimetatud punktides mõõdeti metaani sisalduseks 40,9% ja 18,4%. Punktis P21 saadi tulemuseks 0,2%.

Pinnalt mõõdeti süsihappegaasi 43-st punktist ning süsihappegaasi oli kõigis: vahemikus 0,0–7,9% (joonis 3.4b, lisa 2 tabel 2.5). Kõige enam süsihappegaasi lendus samuti punktis P34, kus esimesel mõõtmisel saadi selle sisalduseks 0,9% ning 10 minuti möödudes saadi tulemuseks 7,9%. Süsihappegaasi sisaldus oli enam kui pooltes mõõtmispunktides mõõtmisperioodi jooksul püsiv ning täiendavat emissiooni prügila kattekihhist ei lisandunud. 50 cm sügavusel oli süsihappegaasi 48-s punktis, vahemikus 0,1–22,8% (joonis 3.4d, lisa 2 tabel 2.6). Suurim tulemus mõõdeti nii metaani kui ka süsihappegaasi puhul nii maa seest kui pinnalt punktis P34. Pärast neljandat mõõtmiskorda saab väita, et on tekkinud kaks peamist punkti (P12 ja P34), kus on igal mõõtmisel saadud maa seest suuremad näitajad kui pinnalt, mis viitab metaani lagundamisele kattepinnaal.



a) CH<sub>4</sub> sisaldus pinnal

b) CO<sub>2</sub> sisaldus pinnal



c) Metaanisisaldus 50 cm sügavusel

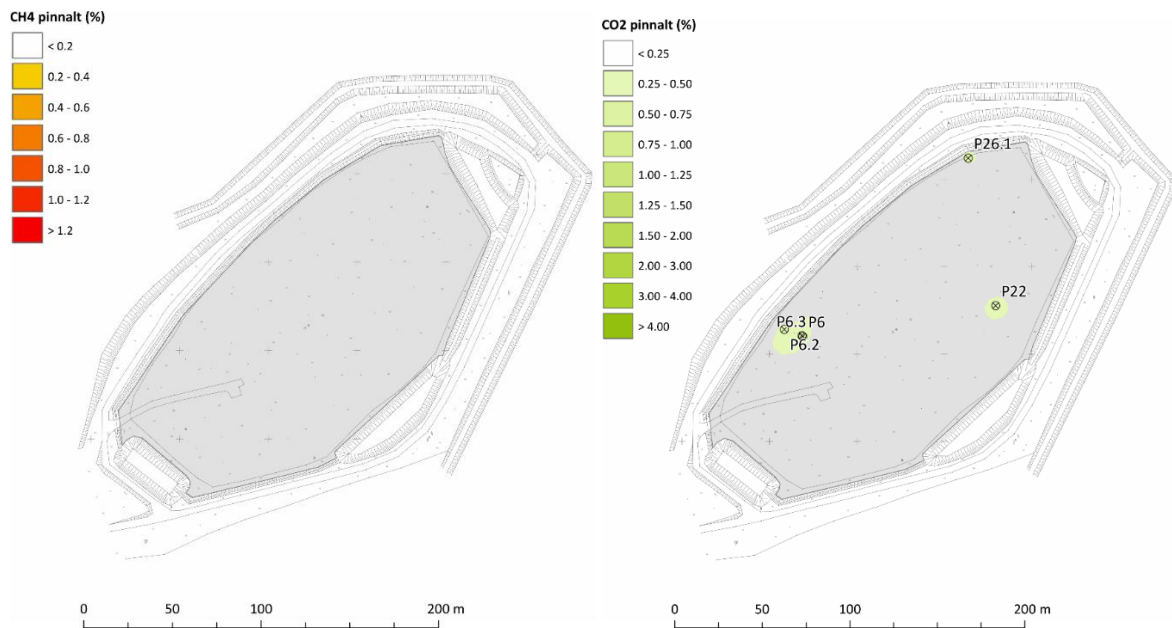
d) CO<sub>2</sub> sisaldus 50 cm sügavusel

**Joonis 3.4.** Metaani ja süsinikdioksiidi sisaldused Sillamäe prügilas 21.–22.10.2017; joonise koostas Ottar Tamm.

### Viies mõõtmiskord

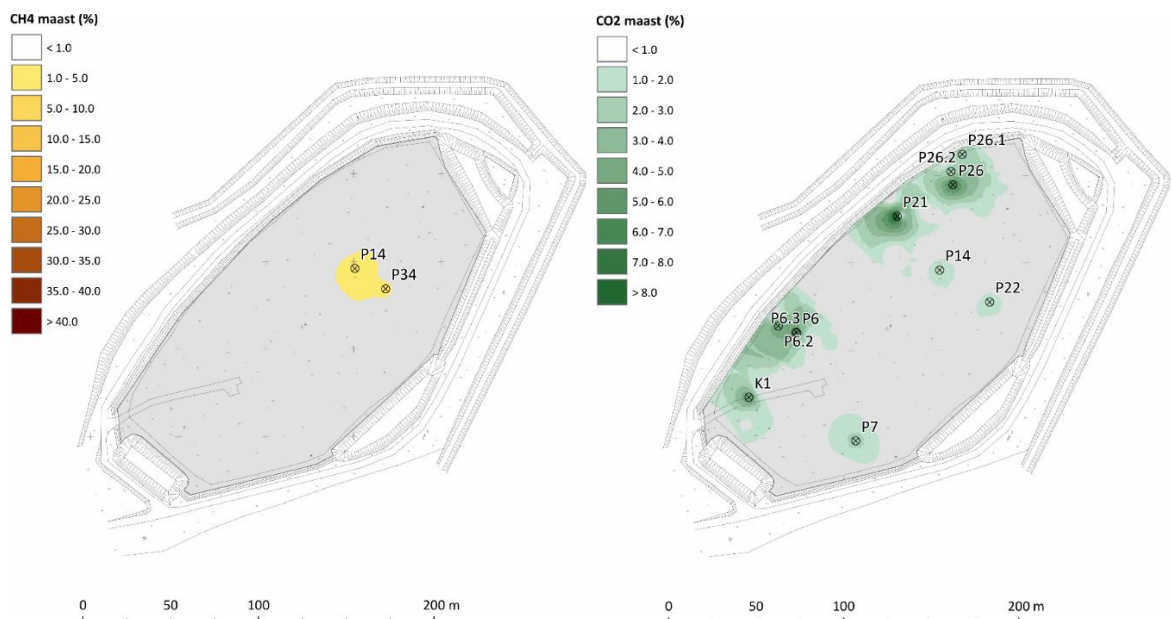
2018 a. mais toimus viimane mõõtmine, kus vahetult enne oli lumi ära sulanud ning maapind ei olnud enam jääs. Mõõtmised viidi läbi pinnalt 44-s punktis ja 46-s punktis maa seest. Prügila pinnalt ei tuvastatud metaani emissiooni mitte üheski punktis, ka mitte pärast 10

minuti möödumist (joonis 3.5a, lisa 2 tabel 2.7). Maa seest täheldati metaani ainult viies punktis (joonis 3.5c, lisa 2 tabel 2.8). Punktides P14 ja P34 mõõdeti metaani 2,1% ja 1,2%.



a) CH<sub>4</sub> sisaldus pinnal

b) CO<sub>2</sub> sisaldus pinnal



c) Metaanisaldus 50 cm sügavusel

d) CO<sub>2</sub> sisaldus 50 cm sügavusel

**Joonis 3.5.** Metaani ja süsinikdioksiidi sisaldused Sillamäe prügilas 04.–05.05.2018; joonise koostas Ottar Tamm.

Prügila pinnalt tuvastati süsihappegaasi 10 minuti jooksul kogunenud gaasis vahemikus 0,0–0,4% (joonis 3.5b, lisa 2 tabel 2.7). Kaheksateistkümnes punktis ei tuvastatud süsihappegaasi emissiooni ka pärast 10 minuti möödumist. 50 cm sügavusel oli

süsihappegaasi kõigis punktides, 10 minuti jooksul kogunenud gaasis vahemikus 0,1–11,2% (joonis 3.5d, lisa 2 tabel 2.8). Suurimad tulemused saadi punktides P6.3, P21 ja P26.

Sillamäe prügilas mõõdetud tulemuste põhjal ei ole tekkiv metaani emissioon ohtlik, kuna selle sisaldus õhus on alla 5% (Streese & Stegmann 2003). Oktoobris mõõdeti Sillamäe prügila pinnalt suurimaks metaani sisalduseks 1,5%, mis on ohtlikust tasemest rohkem kui kolm korda väiksem.

Sillamäe prügila pinnalt esines metaani emissiooni 49 mõõtmispunktist maksimaalselt seitsmes ehk kuni 14,3% punktidest. Heinsoo (2016) poolt Saaremaal asuvas Kudjape prügilas läbi viidud uurimuses tuvastati metaani emissiooni olenevalt mõõtmisajast 1–2 mõõtepunktist, mille kattekiht on samuti varustatud MBT peenfraktsiooni kattekihiga. Sillamäe prügilal mõõdetud tulemused näitavad võrreldes Kudjape prügilaga metaani lendumist atmosfääri pisut suuremalt alalt, kuid peab arvesse võtma, et Sillamäe prügilal oli peaaegu kaks korda rohkem seirepunkte.

Mõõtepunktides P12, P21 ja P34 puudub Sillamäe prügila kattekihil taimkate. See ühtib Scheutz *et al.* (2014) ja Heinsoo (2016) saadud tulemustega, kus kõrgemad metaani kontsentratsioonid mõõdeti samuti just kattekihi taimestamata kohtadest.

Gaasianalüsaatoriga mõõdetud tulemused on ligikaudsed, aga annavad siiski hea ülevaate prügilale paigaldatud metaanilagunduskatte efektiivsusest metaani emissioonide vähendamisel. Gaasiproovide laboratoorne analüüs annaks täpsemad tulemused võrreldes portatiivse masinaga saadud tulemustele (Heinsoo 2016), aga antud töös aja ja tööressursi nappuse tõttu gaasiproovide laboratoorset analüüsi läbi ei viidud. Portatiivse masinaga saadud tulemused on odavamad ja kiiremad kui laborimõõtmised.

Heinsoo (2016) poolt mõõdeti Kudjape prügilas lisaks metaanile ka süsihappegaasi emissiooni, kus esines süsihappegaasi emissiooni 0–55% mõõtmispunktidest. Sillamäe prügilas esines süsihappegaasi emissioon olenevalt mõõtmisajast 0–83% mõõtepunktidest. Süsihappegaasi esinemine viitab kattepinna mikroorganismide elutegevusele, mis võib olla seotud metaani lagundamisega.

### 3.2. Sillamäe prügilas kattematerjali füüsikalise-keemilised omadused

Sillamäe prügilast kaevandatud nelja kaeve pinnaseproovide keskmised tulemused sügavuste kaupa elektrijuhtivuse, pH, kuivaine sisalduse, niiskuse ja temperatuuri (lisa 3, tabel 3.1) kohta on esitatud tabelis 3.1.

**Tabel 3.1.** Sillamäe prügilast kaevandatud kattekihi füüsikalise-keemilised omadused (keskmine  $\pm$  standardhälve)

Parameeter  Kaeve	Elektrijuhtivus ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Kuivaine sisaldus (%)	Niiskus (%) m.k	Temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) m.k
TP 1.1 (0-0,5m)	101 $\pm$ 2	7,978 $\pm$ 0,062	36,6 $\pm$ 0,3	19,0	5,8
TP 1.2 (0,5-1m)	204 $\pm$ 8	7,784 $\pm$ 0,015	47,9 $\pm$ 1,6	16,5	7,7
TP 1.3 (1-1,5m)	294 $\pm$ 13	7,831 $\pm$ 0,031	57,2 $\pm$ 5,2	27	8,4
TP 2.1 (0-0,5m)	141 $\pm$ 7	7,775 $\pm$ 0,047	48,3 $\pm$ 11,6	28,9	5
TP 2.2 (0,5-1m)	178 $\pm$ 11	7,723 $\pm$ 0,039	49,0 $\pm$ 1,7	19,2	7,4
TP 2.3 (1-1,5m)	224 $\pm$ 10	8,107 $\pm$ 0,020	62,9 $\pm$ 0,9	21,9	9,5
TP 3.1 (0-0,5m)	120 $\pm$ 3	7,963 $\pm$ 0,065	55,8 $\pm$ 0,4	38,7	4,8
TP 3.2 (0,5-1m)	140 $\pm$ 1	7,892 $\pm$ 0,006	61,0 $\pm$ 4,6	13,7	5,6
TP 3.3 (1-1,35m)	142 $\pm$ 11	7,985 $\pm$ 0,031	59,3 $\pm$ 2,1	-	6,2
TP 4.1 (0-0,5m)	144 $\pm$ 13	7,965 $\pm$ 0,042	62,3 $\pm$ 0,3	25,8	4,3
TP 4.2 (0,5-1m)	299 $\pm$ 16	7,883 $\pm$ 0,019	64,2 $\pm$ 1,2	55,03	6,1
TP 4.3 (1-1,25m)	325 $\pm$ 28	7,800 $\pm$ 0,058	62,9 $\pm$ 3,3	-	6,6
Huber-Humer <i>et al.</i> (2009) soovituslik väärtus	<4000	6,5–8,5	50–70	30– 0	-

\* - andmed puuduvad

m.k – mõõdeti kohapeal.

Tabelis 3.1 tulemustest on näha, et kõigi nelja kaeve esimese kihi (0–0,5 m) kuivaine sisaldus on väiksem kui alumistes kihtides. See võib olla tingitud asjaolust, et maapind oli 20 cm ulatuses jäätunud ning seetõttu niiskem. Kuivaine sisaldus jäi vahemikku 36,6–64,2%, olles kõrgeim kaeves TP 4.2 (0,5–1m) ja väikseim kaeves TP 1.1 (0–0,5m). Kuivaine sisaldus on

Huber-Humer *et al.* (2009) metaanilagunduskihi soovituslikust piirmäärast madalam kaevete TP1 ja TP2 ülemistes kihtides (kuni 1m). Kõigi proovide vesileotiste elektrijuhtivused on väiksemad kui Huber-Humer *et al.* (2009) soovitatud maksimaalne  $< 4000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Elektrijuhtivused on suurimad neljanda kaeve proovide TP 4.2 (0,5–1m) ja TP 4.3 (1–1,25m) korral.

pH väärtused jäävad kõikide proovide lõikes soovituslikesse piirmääradesse (Huber-Humer *et al.* 2009), varieerudes vahemikus 7,723–8,107.

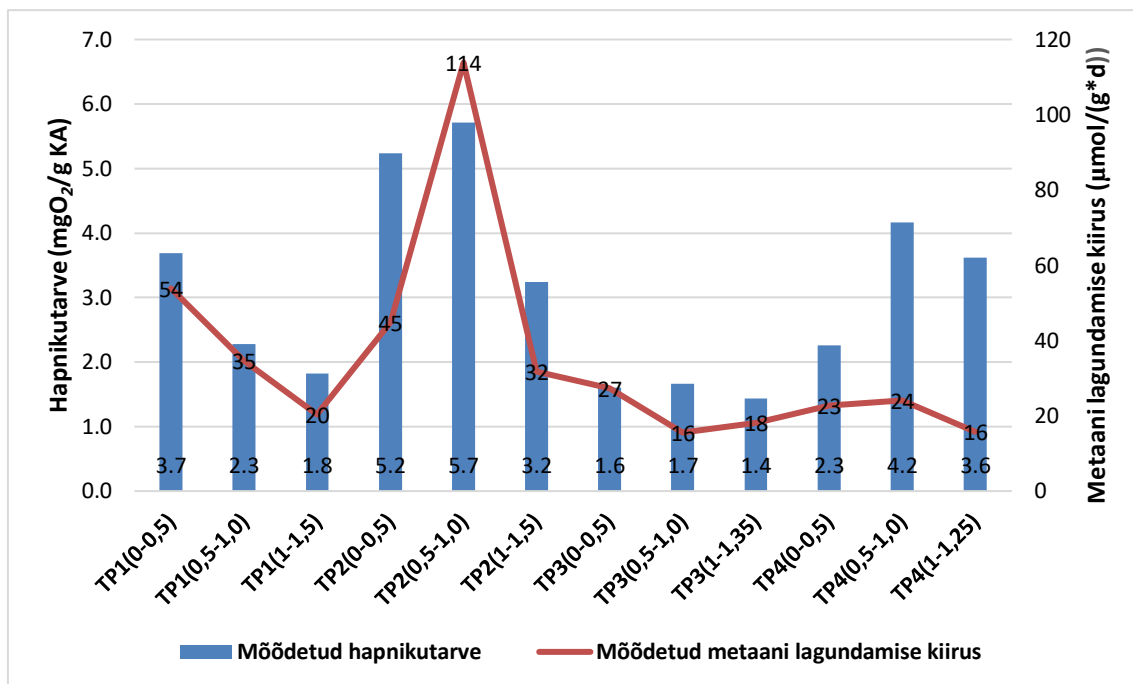
Niiskus on ainult proovis TP 3.1 (0–0,5m) soovituslikes piirmäärades. Proov TP 4.2 (0,5–1m) on liiga niiske ning kõik ülejäänud proovide niiskustase on soovituslikust väiksem. Temperatuuride osas esines seost, et kattekihis sügavamale liikudes temperatuur tõusis.

### **3.3. Prügila kattekihi hapnikutarve ja metaani lagundamise kiirus**

Sillamäe prügilas kattekihi bioloogilise aktiivsuse hindamiseks määrati 7-päeva hapnikutarve. Kuna hapniku olemasolu on vajalik metaani oksüdeerimiseks, võib pinnase suur hapnikutarve viidata võimalikule hapnikupuuduse tekkele.

Sillamäe prügila kattekihist võetud proovide hapnikutarbe väärtused jäid vahemikku 1,4 kuni 5,7 mg O<sub>2</sub>/g KA (joonis 3.6, lisa 3, tabel 3.2). Metaani lagundamise kiiruse väärtused jäid vahemikku 16–114  $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$  (joonis 3.9, lisa 3, tabel 3.2).





**Joonis 3.6.** Sillamäe prügila kattekihi proovide hapnikutarve ja metaani lagundamise kiirus.

Huber-Humer *et al.* (2009) metaanilagunduskihi soovituslikuks hapnikutarbe piirmääraks on  $\leq 8$  mgO<sub>2</sub>/g, seega Sillamäe prügilast saadud tulemuste põhjal saab väita, et kattekiht on bioloogiliselt stabiilne ning kihis ei peaks tekkima hapnikupuudust. Jooniselt 3.6 on näha, et metaani lagundamise kiirus on sõltuv hapnikutarbest. Mõlema näitaja suurimad väärtused saadi proovist TP2 (0,5–1,0) ning kui langeb hapnikutarve, siis langeb ka metaani lagundamise kiirus.

### 3.4. Sõelanalüüsi tulemused

Pinnase lõimise määramiseks kasutati käsi- ja masinsõelumist, et hinnata ja kontrollida, kas pinnases esinevate gaasiemissioonide, füüsikalise-keemiliste omaduste ja fraktsioonilise jaotuse vahel esineb seoseid. 3. aprillil kogutud 12. pinnaseproovi käsitsi sõelumise tulemused on toodud tabelis 3.2. Pinnaseproovid sõeluti käsitsi läbi 25 mm ja 10 mm avadega sõelade, kuna masinsõelumise jaoks oli vaja eraldada suuremad osakesed proovidest.



**Tabel 3.2.** Sillamäe prügilast kogutud pinnaseproovide käsisõelumise tulemused

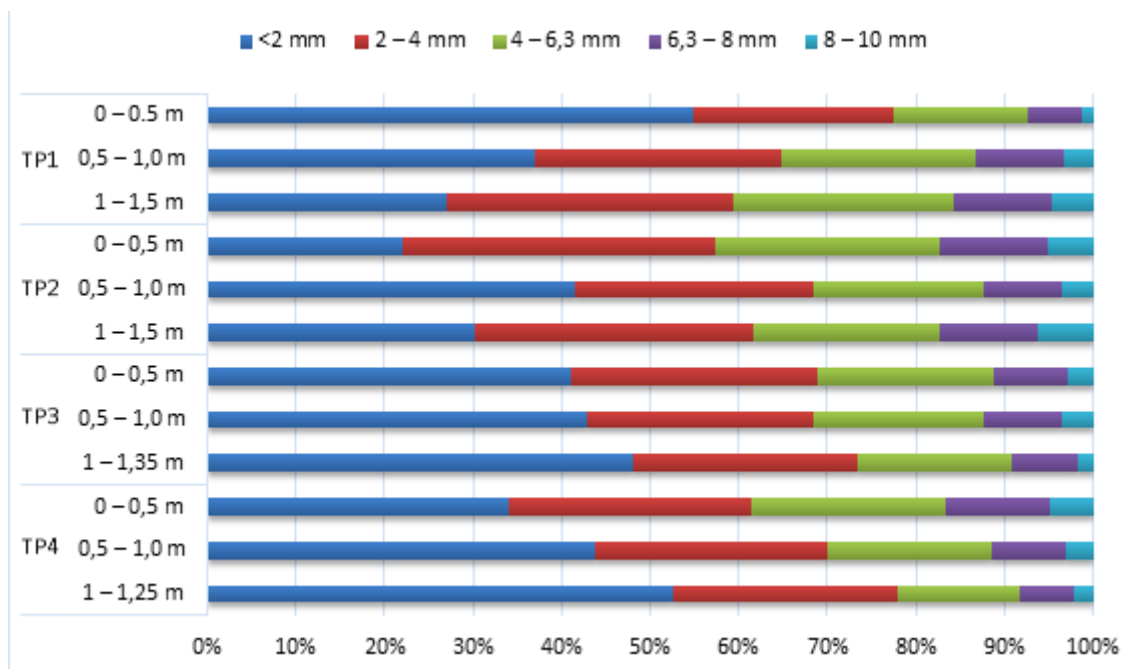
Prooviauuk	Läbimõõt Sügavus	>25 mm	10–25 mm	<2–10 mm
TP 1	0–0,5 m	23.4%	14.8%	61.8%
	0,5–1,0 m	29.5%	18.7%	51.8%
	1–1,5 m	47.4%	15.1%	37.5%
TP 2	0–0,5 m	24.7%	23.0%	52.3%
	0,5–1,0 m	24.2%	17.6%	58.1%
	1–1,5 m	32.0%	19.4%	48.6%
TP 3	0–0,5 m	24.7%	18.9%	56.5%
	0,5–1,0 m	18.9%	17.8%	63.3%
	1–1,35 m	22.3%	18.3%	59.4%
TP 4	0–0,5 m	37.9%	19.2%	42.9%
	0,5–1,0 m	38.6%	16.1%	45.3%
	1–1,25 m	43.2%	17.3%	39.5%

Tabelist 3.2 on näha, et kõigis proovides on kõige väiksema osakaaluga fraktsioon 10–25 mm, seejärel suurem kui 25 mm fraktsioon ning 10-ne proovi puhul oli kõige väiksema fraktsiooni osakaal kõige suurem.

Kui võrrelda kaevete sügavamaid kihte, siis kõigi fraktsioonide vahemik jääb 22,3–47,4%. Antud tulemuse üheks põhjuseks võib pidada kaevamisel nähtut, et viimane kiht sisaldas jäätmeid. Sõelanalüüsi tulemusi ja metaani lagundamise kiiruse tulemusi kõrvutades ilmneb, et kaeves TP4 on metaani lagundamise kiiruse tulemused kõige madalamad ning samuti on selles kaeves kõige väiksem osakaal fraktsioonil <2–10 mm, kui teistes kaevetes (tabel 3.2).

Masinsõelumise tulemused on toodud joonisel 3.7 (lisa 3, tabel 3.3). Kõigi nelja kaeve kihtides 0–0,5 meetrit on näha, et kogu struktuurist moodustavad minimaalselt 60% ja maksimaalselt kuni 75% osakesed suurusega alla 2 mm ja 2–4 mm. See kiht on taimede kasvupinnaseks ning seega on loogiline, et valdav enamus koostisest on  $\leq 4$  mm. Antud materjali läbimõõt on ka sobilik metanotroofide elukeskkonnaks. Kõigi kaevete puhul oli kõige väiksem osakaal fraktsioonil suurusega 8–10 mm. Sügavusel 0,5–1 meetrit oli kõige suurem osakaal fraktsioonil alla 2 mm ning kõige väiksem osakaal jällegi 8–10 mm-l

fraktsioonil. Kõigi viie fraktsiooni puhul on näha astmelist kahanemist, mida suurem fraktsioon, seda väiksem osakaal kogumassist.



**Joonis 3.7.** Sillamäe prügilast kogutud pinnaseproovide masinsõelumise tulemused.

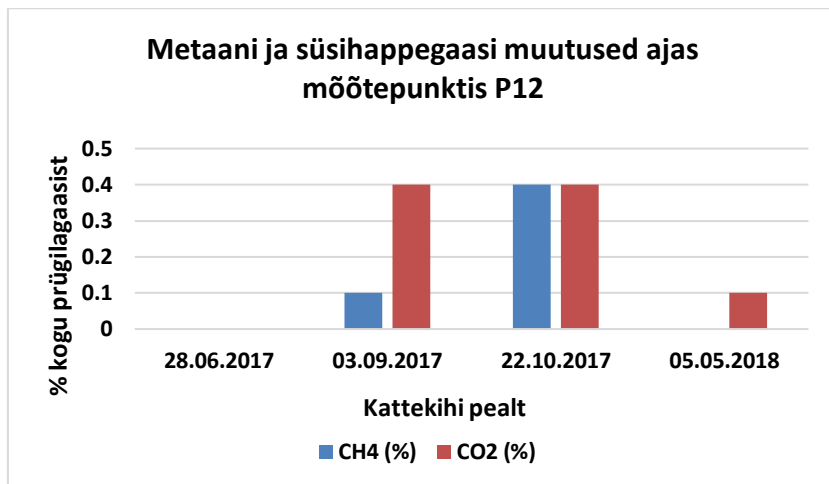
Proovid TP1 (0–0,5) ja TP4 (1–1,25) koosnevad kõige rohkem peenema osakeste fraktsioonidest ning mõlemas proovis oli mõõdetud hapnikutarve väärtused ligilähedased (joonised 3.6 ja 3.7). TP4 (1–1.25) proovi põhjal ei saa teha objektiivset järeldust, kuna selle kihi kaevesügavus oli 25 cm (gaasijaotuskihi tõttu).

### 3.5. Prügilagaasi sisalduse muutumine ajas pinnalt ja kattekihis

Paljudes mõõtepunktides ei esinenud prügila pinnal metaani emissioone. Maa seest mõõtes saadi kinnitust, et metaan on kattekihi sees olemas ning alati esineb ka süsihappegaasi. Tähelepanuväärsemateks mõõtepunktideks olid P12, P21 ja P34, kus esinesid suurimad gaasiemissiooni muutused.

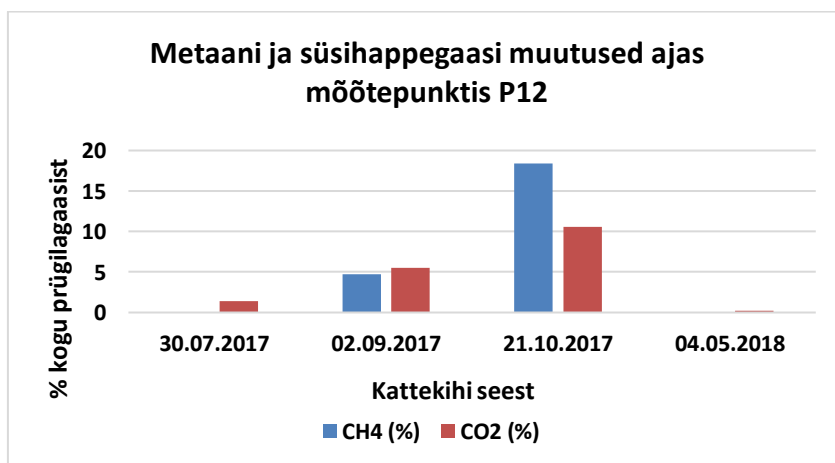
Jooniselt 3.8 on toodud punkti P12 mõõtmistulemused kõigil neljal mõõtmiskorral kattekihi pinnalt. Juunis ei tuvastatud esimesel mõõtmisel metaani ega süsihappegaasi. Septembris saadi 10 minuti jooksul metaani sisalduseks 0,1% ning süsihappegaasi 0,4%, mis võiks kinnitada metaani lagunemist. Oktoobris saadi metaani ja süsihappegaasi kõrgemaid

tulemused, mõlema puhul 0,4% kogu prügilagaasist. Mais jällegi metaani ei esinenud ning süsihappegaasi oli 0,1%.



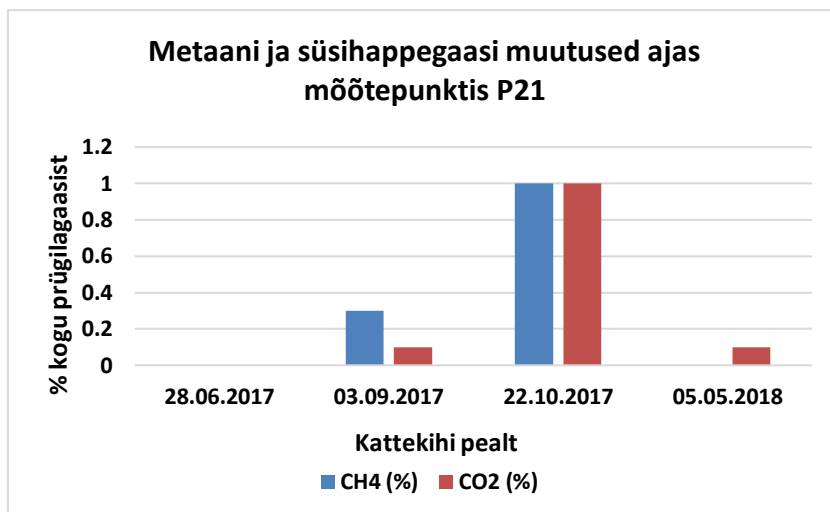
**Joonis 3.8.** Metaani ja süsihappegaasi muutused ajas Sillamäe prügila pinnalt mõõtepunktis P12.

Joonisel 3.9 on toodud mõõtepunkti P12 kõik mõõtmisperioodi tulemused läbi aja kattekihi seest. Süsihappegaasi esines kõigil neljal korral, suurimad sisaldused saadi nii metaani (18,4%) kui süsihappegaasi (10,6%) puhul oktoobris. Teistel kuudel olid mõõtetulemused madalamad ning juulis ja mais ei esinenud metaani üldse.



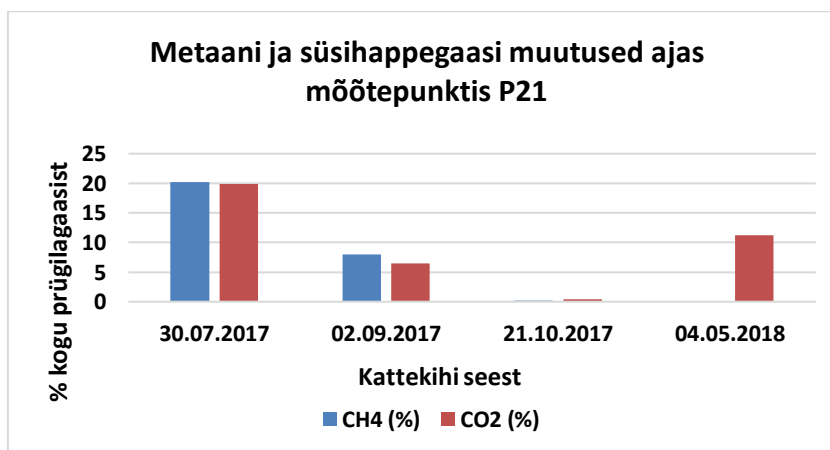
**Joonis 3.9.** Metaani ja süsihappegaasi muutused ajas Sillamäe prügila 50 cm sügavuses kattekihis mõõtepunktis P12.

Punktis P21 saadi samuti kõrgemaid metaani sisaldused kattekihi pinnalt oktoobris. Kui septembris mõõdeti prügilagaasi koostises metaani 0,3%, siis oktoobris saadi 1% (joonis 3.10). Süsihappegaasi esines samuti kasvas trendis, kus oktoobris saadi 0,9% kõrgem tulemus kui septembris. Juunis ja mais metaani kattekihi peal ei esinenud.



**Joonis 3.10.** Metaani ja süsihappegaasi muutused ajas Sillamäe prügila pinnalt mõõtepunktis P21.

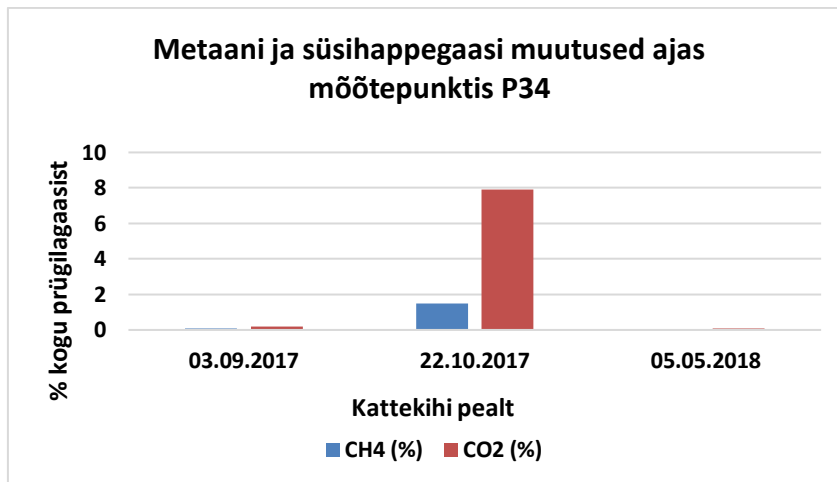
Mõõtepunktis P21 kattekihi seest saadud tulemused erinevad kattekihi pinnalt saadud tulemustest märgatavalt. Suurimad gaasinäitajad mõõdeti juulis, metaani 20,2% ja süsihappegaasi 19,9% kogu prügilagaasist (joonis 3.11). Antud tulemused viitavad kattekihis olevate bakterite aktiivsele elutegevusele. Septembris ja oktoobris vähenesid gaaside emissioonid antud punktis märgatavalt. Kõiki tulemusi võrreldes oli märgata, et septembris ja oktoobris vähenes prügilagaaside sisaldus läänenõlval ning tõusis idanõlval. Metaani ei esinenud üldse mai kuus, kuid see eest oli süsihappegaasi sisaldus väga kõrge, mis võib viidata aktiivsele metaani lagundamisele.



**Joonis 3.11.** Metaani ja süsihappegaasi muutused ajas Sillamäe prügila 50 cm sügavuses kattekihis mõõtepunktis P21.

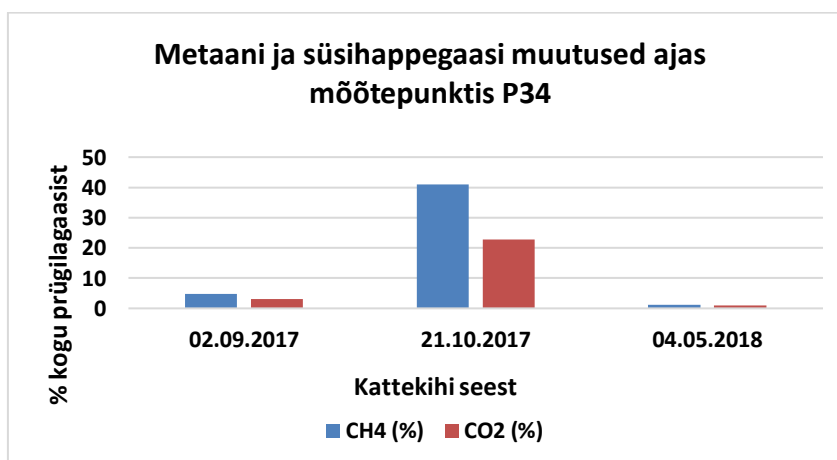
Mõõtepunkti P21 ja P12 on septembri ja oktoobri tulemused võrdväärsed (joonised 3.8 – 3.11), mõlemas punktis mõõdeti suuremad tulemused kattekihi seest kui pinnalt ning mais eritus mõlemast punktist 0.1% süsihappegaasi.

Punktis P34 mõõdeti 2017. aasta oktoobris 10 minuti jooksul prügila pinnalt lendunud metaani kõige enam – 1,5%, kuid eelnevad ja järgnevad mõõtmistulemused olid madalamad: septembris 0,1% ja mais 0,0% (joonis 3.12). Septembrist oktoobrini suurenes metaani sisaldus 1,4% kogu prügilagaasist. Süsihappegaasi tulemustes on märgata sarnast trendi, suurim tulemus saadi oktoobris ning septembris ja mai näidud olid madalamad.



**Joonis 3.12.** Metaani ja süsihappegaasi muutused ajas Sillamäe prügila pinnalt mõõtepunktis P34.

Jooniselt 3.13 on näha, et punkti P34 mõõtetulemused kattekihi seest on kordades kõrgemad kui kattekihi pinnalt. Kõrgeim metaani sisaldus mõõdeti taaskord oktoobris (40,9%), kui samal ajal sama punkti pinnalt saadi metaani sisalduseks vaid 1.5% (joonis 3.12). Seega saab suure tõenäosusega väita, et kattekihis toimub metaani lagunemine. Septembris ja mais mõõdeti oluliselt madalamad tulemused, kuid needki viitavad metaani vähenemisele kattekihis.



**Joonis 3.13.** Metaani ja süsihappegaasi muutused ajas Sillamäe prügila 50 cm sügavuses kattekihis mõõtepunktis P34.

## KOKKUVÕTE

Prügilagaasi kontrollimine on aktuaalne keskkonnaprobleem üle kogu maailma. Suurimaks probleemiks on prügilagaasis olev metaan, mis põhjustab atmosfääri soojenemist ning on tule- ja plahvatusohtlik. Seetõttu tuleb prügilates tekkivat metaani emissioon kontrolli all hoida ning võimalusel seda vältida. Üheks võimalikuks lahenduseks peetakse prügilate katmist bioaktiivse-kattekihiga.

Ida-Virumaal asuv Sillamäe prügila on esimene prügila Eestis, kus kasutati bioloogiliselt-mehaaniliselt töödeldud jäätmeid bioaktiivse-kattekihi rajamiseks.

Käesoleva magistritöö käigus uuriti Sillamäe prügila kattekihi tõhusust metaani lagundamisel. Selleks mõõdeti portatiivse gaasianalüsaatoriga GA5000 kokku viiel korral prügilast lendunud gaasi koostist kuni 49-st punktist prügila pinnalt ja 50 cm sügavuselt kattekihi seest.

Mõõtmistulemustest selgus, et valdavalt metaanilagunduskattekiht toimib, kuid mõnes piirkonnas esineb periooditi prügilagaasi lekkeid. Juunis pinnalt mõõtes metaani ega süsihappegaasi ei tuvastatud. Juulis mõõdeti prügilagaase 50 cm sügavuselt ning kattekihi sees esines gaase kolmes mõõtepunktis – P14, P16 ja P21. Sellega saadi kinnitust, et prügilas tekib metaani. Septembris läbiviidud mõõtmistel tuvastati 50 cm sügavuselt metaani kolmeteistkümnes punktis vahemikus 0,1–14,9%. Prügila pinnalt tuvastati metaani, aga ainult kolmes punktis – P12, P21 ja P34 – ning sisaldused ei olnud suured, vahemikus 0,1–0,3%. Nendes punktides mõõdeti kõige suuremad metaani sisaldused ka 50 cm sügavuselt. Oktoobris saadi Sillamäe prügilas kõige suuremad metaani sisalduse tulemused. Prügila seest tuvastati metaani kahekümne ühes punktis, vahemikus 0,1–40,9%. Prügila pinnalt mõõdeti metaani seitsmes punktis, kus suurimad tulemused saadi taaskord punktides P12, P21 ja P34, suurimaks tulemuseks mõõdeti 1,5%. Mais prügila pinnalt metaani emissioone ei tuvastatud, kattekihi seest mõõdeti metaani 2,1% punktis P14. Tulemuste põhjal saab väita, et metaani lekib ebastabiilselt, kuna kahel korral ei mõõdetud prügila pinnal metaani üldse ning kahel korral saadi suurimad emissioonid samadest punktides prügila ida- ja

läänenõlval. Sellegipoolest on Sillamäe prügilast lenduvad metaani kogused võrreldavad Kudjape prügilas saadud tulemustega.

Lisaks metaanile mõõdeti käesolevas töös ka süsihappegaasi sisaldusi. Sillamäe prügilas tuvastati süsihappegaasi olenevalt mõõtmisajast 0–83% mõõtepunktidest. Antud tulemus kinnitab, et kattepinnases toimub organismide elutegevus.

Aprillis teostatud kaevetöödest selgus, et Sillamäe prügila kattekihi konstruktsioon ei vasta sulgemisprojektile. Punktides TP1 ja TP2 ei tuvastatud gaasijaotuskihti kuni sügavuseni 1,7 m ning ladestatud prügi oli alates 70 cm sügavusel. Kaevetööde käigus kogutud proovide laboratoorsest analüüsist selgus, et kattepinnase elektrijuhtivus, pH ja niiskustaseme keskmised tulemused jäid kirjanduses soovitatud piirmääradesse ning peaks olema metanotroofide elutingimusteks sobivad. Samuti mõõdeti kattematerjali metaani lagundamise võimet ja hapnikutarvet, kust selgus, et metaani lagundamise kiirus on sõltuv hapnikutarbest. Sillamäe prügilas on parimad tingimused metaani lagundamiseks kaevepunktis TP2, samas on prügila eri punktides ja sügavustel pinnase omadused väga erinevad.

Pinnaseproovide masinsõelumise tulemustest selgus, et kattematerjal koosneb 60–75% ulatuses fraktsioonist väiksem kui 4 mm, mis on sobivaks keskkonnaks metaani lagundavatele bakteritele.

Arvestades asjaolu, et Sillamäe prügila metaanilagunduskattekiht ei vasta projektis täpselt kirjeldatud oludele, võib siiski hinnata selle efektiivsust metaani oksüdeerimisel heaks, kuna kattekihi seest tuvastati palju suuremad metaani kogused kui prügila pinnalt.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Abushammala, M.F.M., Basri, N.E.A., Kadhum, A.A.H., Basri, H., El-Shafie, A.H., Sharifah Mastura, S.A.** (2013). Evaluation of methane generation rate and potential from selected landfills in Malaysia. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Vol 11, No 2, pp 377-384.
- Abushammala, M.F.M., Basri, N.E.A., Dani Irwan, D., Younes, M.Y.** (2014). Methane Oxidation in Landfill Cover Soils: A Review. - *Asian Journal of Atmospheric Environment*. Vol 8, No 1, pp 1-14.
- Albanna, M., Fernandes, L., Warith, M.** (2007). Methane oxidation in landfill cover soil; the combined effects of moisture content, nutrient addition, and cover thickness. - *Journal of Environmental Engineering & Science*. Vol 6, pp 191-200.
- Barlaz, M.A., Green, R.B., Chanton, J.P., Goldsmith, C.D., Hater, G.R.** (2004). Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. *Environmental Science and Technology*. Vol 38, pp 4891-4899.
- Bogner, J., Meadows, M., Czepiel, P.** (1997). Fluxes of methane between landfills and the atmosphere: natural and engineered controls. - *Soil Use and Management*. Vol 13, No S4, pp 268-277.
- Bogner, J., Abdelrafie Ahmed, M., Diaz, C., Faaij, A., Gao, Q., Hashimoto, S., et al.** (2007) Waste Management, In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B.Metz, O.R.D.P.R.B.R.D.L.A.M. (ed). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Both, R.** (2001). Directive on odour in ambient air: an established system of odour measurement and odour regulation in Germany - *Water Science and Technology*. pp 119-126
- Börjesson, G., Sundh, I., Tunlid, A., Svensson, B. H.** (1998). Methane oxidation in landfill cover soils, as revealed by potential oxidation measurements and phospholipid fatty acid analyses. - *Soil Biol. Biochem.* Vol. 30, No. 10-11, pp. 1423-1433.
- Börjesson, G., Samuelsson, J., Chanton, J.** (2007) Methane oxidation in Swedish landfills quantified with the stable carbon isotope technique in combination with an optical method for emitted methane. *Environmental Science and Technology* Vol 41, pp 6684-6690.



- Cao, Y., Staszewska, E.** (2013). Role of Landfill Cover in Reducing Methane Emission. Polish Academy of Sciences and Institute of Environmental Engineering of the Polish Academy of Sciences, Zabrze, Poland. Archives of Environmental Protection Vol 39, pp 115–126.
- Chanton, J., Abichou, T., Langford, C., Spokas, K., Hater, G., Green, R., Goldsmith, D., Barlaz, M.W.** (2011). Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils. Waste Management. Vol 31, pp 914-925.
- Cheremisinoff, N. P.**, (2003). Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies. pp 101; 113
- Christophersen, M., Linderød, L., Jensen, P.E., Kjeldsen, P.** (2000). Methane oxidation at lowtemperatures in soil exposed to landfill gas. Journal of Environmental Quality. Vol 29, pp 1989–1997.
- Christophersen, M., Kjeldsen, P., Holst, H., Chanton, J.** (2001). Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation. Waste Management & Research. Vol 19, pp 595-612.
- Czyrnek-Delêtre, M.M., Ahern, E.P., Murphy, J.D.** (2012). Is small-scale upgrading of landfill gas to biomethane for use as a cellulosic transport biofuel economically viable? Biofuels Bioprod – Biorefining. Vol 6, pp 246-256.
- Dever, S.A., Swarbrick, G.E., Stuetz, R.M.** (2007). Passive drainage and biofiltration of landfill gas: Australian field trial. Waste Management. Vol 27, pp 277–286.
- Einola, J.K., Kettunen, R.H., Rintala, J.A.** (2007). Responses of methane oxidation to temperature and water content in cover soil of a boreal landfill. – Soil Biology & Biochemistry. Vol 39, pp 1156-1164.
- Einola, J., Sormunen, K., Lensu, A., Leiskallio, A., Ettala, M., Rintala, J.** (2009). Methane oxidation at a surface-sealed boreal landfill. - *Waste Management*. Vol 29, No 7, pp 2105–2120.
- Fischer, C., Maurice, C., Lagerkvist, A.** (1999). Gas Emission from Landfills: An Overview of Issues and Research Needs Survey. Stockholm: AFN, Naturvårdsverket.
- Gebert, J., Gröngroft, A.** (2006). Performance of a passively vented field-scale biofilter for the microbial oxidation of landfill methane. Waste Management. Vol 26, pp 399-407.
- Geotech.** (2016). Biogas 500 Gas Analyser Operating Manual. [veebileht] <http://www.geotechuk.com/si te/wp -content/uploads/2016/01/BIOGAS-5000-Operating-Manual.pdf>
- Heinsoo, M.** (2016). Kudjape prügila metaanilagunduskatte uuring. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu.
- Hrad, M.** (2010). Quantification of landfill gas emissions in biocovers – an experimental simulation in lysimeters. (Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieurin). Universität für Bodenkultur Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt Institut für Abfallwirtschaft, Wien.

- Hrad, M., Huber-Humer, M., Wimmer, B., Reichenauer, T.G.** (2012). Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfills – An experimental simulation in lysimeters. *Waste Management*. Vol 32, pp 2324–2335.
- Humer, M., Lechner, P.** (2001). Design of a landfill cover layer to enhance methane oxidation – results of a two year field investigation. In: *Proceedings Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy, CISA.
- Huber-Humer, M.** (2004). International research into landfill gas emissions and mitigation strategies – IWWG working group „CLEAR“. - *Waste Management*. Vol 24, No 4, pp 425–427
- Huber-Humer, M., Amann, A., Bogolte, T., Santos, M. D., Hagenauer, I., Pauliny, W., Reichenauer T., Watzinger, A., Wimmer, B.** (2008) *Technischer Leitfaden Methanoxidationschichten*, Wien. (ref Sillamäe ...2013)
- Huber-Humer, M., Gebert, J., Hilger, H.** (2008). Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. – *Waste Management & Research*. Vol 26, No 1, pp 33–46.
- Huber-Humer, M., Röder, S., Lechner, P.** (2009). Approaches to assess biocover performance on landfills. - *Waste Management*. Vol 29, No 7, pp 2092–2104.
- Huber-Humer, M., Tintner, J., Böhm, K., Lechner, P.** (2011). Scrutinizing compost properties and their impact on methane oxidation efficiency. - *Waste Management*. Vol 31, pp 871–883.
- IPPC.** (2007). *Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds. Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Meyer, L.A.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC.** (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jain, P., Townsend, T. G., Johnson, P.** (2013). Case study of landfill reclamation at a Florida landfill site. - *Waste Management*. Vol. 33, No. 1, pp. 109–116.
- Jugnia, L.-B., Cabral, A.R., Greer, C.W.** (2008). Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover. *Ecological Engineering*. Vol 33, No 2, pp 102-109.
- Keskkonnaamet.** (2013). Korraldus nr V 1-15/13/386. Sillamäe prügila sulgemiskava ja sulgemisotsuse (05.05.2008 nr 32-1-1/5191) muutmise. Jõhvi.
- Kim, T.G., Lee, E.-H., Cho, K.-S.** (2013). Effects of nonmethane volatile organic compounds on microbial community of methanotrophic biofilter - *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol 97, No 14, pp 6549-6559.

- Kjeld, A.** (2013). Microbial Methane Oxidation at the Fíflholt landfill in Iceland. (Master's thesis). University of Iceland School of Engineering and Natural Sciences Faculty of Civil and Environmental Engineering. Reykjavik.
- Kjeldsen, P., Dalager, A., Broholm, K.** (1997). Attenuation of Methane and Nonmethane Organic Compounds in Landfill Gas Affected Soils. - Journal of the Air & Waste Management Association. Vol 47, No 12, pp 1268 – 1275.
- Kriipsalu, M., Truu, J., Maastik, M.** (2006). Gaasiseire Laguja prügilas. Eesti Maaülikool, Tartu.
- Kriipsalu, M., Maastik, M., Truu, J.** (2016). Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 376 lk.
- Nõukogu direktiiv 1999/31/EÜ, 26. aprill 1999, prügilate kohta. (vastu võetud 26.04.1999 jõustunud 16.07.1999). – Euroopa Liidu Teataja <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031&from=ET> (13.03.2018)
- Lee, E.-H., Moon, K.-E., Kim, T.G., Cho, K.-S.** (2014). Depth profiles of methane oxidation potentials and methanotrophic community in a lab-scale biocover - Journal of Biotechnology. Vol 184, pp 56-62.
- Lou, Z., Wang, L., Zhao, Y.** (2011). Consuming un-captured methane from landfill using aged refuse bio-cover - Bioresource Technology. Vol 102, pp 2328-2332
- Lu, W.-J., Chi, Z.-F., Mou, Z.-S., Long, Y.-Y., Wang, H.-T., Zhu, Y.** (2011). Can a breathing biocover system enhance methane emission reduction from landfill? Journal of Hazardous Materials. Vol 191, pp 228–233.
- Maa-amet.** (2018). Maainfo kaardirakendus. [http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGis?app\\_id=UU82&user\\_id=at&bbox=714173.227257749,6585547.083,715308.802742251,6586158.777&LANG=1](http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGis?app_id=UU82&user_id=at&bbox=714173.227257749,6585547.083,715308.802742251,6586158.777&LANG=1) (19.05.2018)
- Majdinasab, A., Yuan, Q.** (2017). Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review - Ecological Engineering. Vol 104, Part A, pp 116-130.
- Mei, C., Yazdani, R., Han, B., Mostafid, M. E., Chanton, J., VanderGheynst, J., Imhoff, P.** (2015). Performance of Green Waste Biocovers for Enhancing Methane Oxidation. - *Waste Management*. Vol. 39, No. 5, pp. 205–215.
- Moon, K.-E., Lee, E.-H., Kim, T.G., Cho, K.-S.** (2014). Tobermolite effects on methane removal activity and microbial community of a lab-scale soil biocover - Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. Vol 41, No 7, pp 1119-1129.
- Oonk, H.** (2010). Literature review. Methane from landfills. Methods to quantify generation, oxidation and emission. Pp 1-75.
- Pehme, K.-M.** (2013). Kudjape prügila metaanilagunduskihi keemiliste ja hüdrofüüsikaliste omaduste uuring. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.

- Platen, H., Wirtz, A.** (1999). Application of analysis no 1. Measurement of the respiration activity of soils using the OxiTop Control measuring system. Basic principles and process characteristic. 1st edition. Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH & Co. KG.
- Prügila rajamise, kasutamise ja sulgemise nõuded<sup>1</sup>. (vastu võetud 29.04.2004, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.01.2016). – Riigi teataja. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/119122015003?leia> Kehtiv (13.03.2018)
- Rettemberger, G.** (2005). Landfill gas characterization over time – The 9-phase model. Sardinia Symposium – 30th Anniversary Book. Pp 237-248.
- Scheutz, C., Kjeldsen, P.** (2004). Environmental factors influencing attenuation of methane and hydrochlorofluorocarbons in landfill cover soils. - J. Environ. Qual. Vol 33, No 1, pp 72–79.
- Scharff, H., Jacobs, J., Oonk, H., Hensen, A.** (2005). Methods to ascertain methane emission of landfills.
- Scheutz, C., Kjeldsen, P., Bogner, J., De Visscher, A., Gebert, J., Hilger, H. A., Huber-Humer, M., Spokas, K.** (2009). Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation for mitigation of landfill gas emissions. - Waste Management & Research. Vol 27, No 5, pp 409–455.
- Scheutz, C., Fredenslund, A.M., Nedenskov, J., Samuelsson, J., Kjeldsen, P.** (2011). Gas production, composition and emission at a modern disposal site receiving waste with a low-organic content. Waste Management. Vol 11, pp 946-955.
- Scheutz, C., Ucendo, I.M.B., Pedersen, R.B., Petersen, P.H., Mønster, J.G., Samuelsson, J., Jørgensen, J.H.B., Kjeldsen, P.** (2014). Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. - *Waste Management*. Vol 34, No 7, pp 1179–1190.
- Sillamäe prügila sulgemine. (2014). Tööprojekt. KOBRA AS.
- Sillamäe Linnavalitsuse poolt koostatud Sillamäe prügila sulgemiskava muudatus. (2013). Sulgemiskava. KOBRA AS.
- Sillamäe prügila sulgemislahenduse keskkonnamõju hindamine. (2008). Aruanne. AS Kommunaalprojekt. 53 lk.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M.** (2007). Climate Change 2007 - The Physical Science Basis
- Stern, J.C., Chanton, J., Abichou, T., Powelson, D., Yuan, L., Escoriza, S., Bogner, J.** (2007). Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. - Waste Management. Vol 27, No 9, pp 1248–1258.
- Zhang, H., Yan, X., Cai, B., Zhang, Y., Liu, J., Ao, H.** (2015) The effects of aged refuse and sewage sludge on landfill CH<sub>4</sub> oxidation and N<sub>2</sub>O emissions: roles of moisture content and temperature. Ecological Engineering. Vol 74, pp 345-350.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F.** (2002). Handbook of solid waste management. New York: McGraw-Hill. (Joonis 1.1: Prügila gaasi koostis prügila olelusringi vältel)

- University of NSW. (2009). School of Civil and Environmental Engineering. Handbook for the design, construction, operation, monitoring and maintenance of a passive landfill gas drainage and biofiltration system.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. (2012). Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2010. Washington, DC.wang
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. (2018). [veebileht] <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#carbon-dioxide> (26.04.2018)
- Wang, J., Xia, F-F., Bai, Y., Fang, C-R., Shen, D-S., He, R.** (2011). Methane oxidation in landfill waste biocover soil: Kinetics and sensitivity to ambient conditions. - Waste Management. Vol 31, No 5, pp 864–870.

**LISAD**

## LISA 1. Sillamäe prügila mõõtmispunktide ning kaevete koordinaadid

**Tabel 1.1.** Kudjape prügila mõõtmispunktide ning kaevete rist-koordinaadid süsteemis L-EST97, mõõdetud autori poolt

JRK	Koordinaadid (L-EST97)		JRK	Koordinaadid (L-EST97)	
	X	Y		X	Y
1	59.35592	27.776	18	59.35611	27.77849
2	59.35592	27.77635	19	59.35661	27.77884
3	59.35609	27.77653	20	59.35678	27.77824
4	59.35573	27.7767	21	59.35694	27.77798
5	59.35604	27.77668	21.1	59.35695	27.77827
6	59.35637	27.77691	21.2	59.35703	27.77793
6.1	59.35648	24.7767	21.3	59.35694	27.77802
6.2	59.35641	27.77673	22	59.35647	27.77886
6.3	59.35637	27.7769	23	59.35632	27.7793
7	59.3558	27.77744	24	59.35677	27.77896
8	59.35563	27.77725	25	59.35691	27.77862
9	59.35603	27.77705	26	59.35708	27.77856
10	59.35628	27.77753	26.1	59.35724	27.77867
11	59.35624	27.77708	26.2	59.35715	27.77855
11.1	59.35631	27.77722	26.3	59.3572	27.77849
11.2	59.35635	27.77706	27	59.35675	27.7793
11.3	59.35628	27.77707	28	59.35678	27.77966
12	59.35607	27.77771	29	59.35698	27.77904
12.1	59.35611	27.77794	30	59.35717	27.7792
12.2	59.35591	27.778	31	59.35732	27.77896
12.3	59.35599	27.77787	32	59.35694	27.77933
13	59.35583	27.77803	33	59.35675	27.77794
14	59.35665	27.77838	34	59.35654	27.77867
15	59.35661	27.77742	K1	59.35605	27.77639
15.1	59.35661	27.77724	K2	59.35647	27.77795
15.2	59.35659	27.7772	K3	59.35677	27.77927
15.3	59.35658	27.77733	TP1	59.35607	27.77771
16	59.35681	27.77733	TP2	59.35654	27.77867
17	59.35614	27.77816	TP3	59.35673	27.77909
			TP4	59.35655	27.77799

## LISA 2. Sillamäe prügilal teostatud prügilagaasi emissiooni mõõtmiste tulemused prügila pinnalt

**Tabel 2.1.** Sillamäe prügila pinnalt prügilagaaside mõõtmiste tulemused 28.06.2017

JRK	Aeg	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	CH <sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min	CO <sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min
1	0 min	0	0.1	20.9	79	0	0
	10 min	0	0.1	20.5	79.4	-	-
2	0 min	0	0	20.6	79.4	0	0
	10 min	0	0	20.3	79.7	-	-
3	0 min	0	0	20.5	79.5	0	0
	10 min	0	0	20.8	79.2	-	-
4	0 min	0	0	20.9	79.1	0	0
	10 min	0	0	21	79	-	-
5	0 min	0	0	21	79	0	0
	10 min	0	0	21	79	-	-
6	0 min	0	0	21.1	78.9	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
7	0 min	0	0	21.2	78.8	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
8	0 min	0	0	21.1	78.9	0	0
	10 min	0	0	21	79	-	-
9	0 min	0	0	21	79	0	0
	10 min	0	0	21.3	78.7	-	-
10	0 min	0	0	21.4	78.6	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-
11	0 min	0	0	21.5	78.5	0	0
	10 min	0	0	21	79	-	-
12	0 min	0	0	20.9	79.1	0	0
	10 min	0	0	20.7	79.3	-	-
13	0 min	0	0	20.6	79.4	0	0
	10 min	0	0	20.4	79.6	-	-
14	0 min	0	0	20.5	79.5	0	0
	10 min	0	0	20.9	79.1	-	-
15	0 min	0	0	21.1	78.9	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
16	0 min	0	0	21	79	0	0
	10 min	0	0	20.9	79.1	-	-
17	0 min	0	0	21.1	78.9	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
18	0 min	0	0	21.1	78.9	0	0
	10 min	0	0	21.2	78.8	-	-
19	0 min	0	0	21.5	78.5	0	0
	10 min	0	0	21.3	78.7	-	-



<b>JRK</b>	<b>Aeg</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min</b>
20	0 min	0	0	21.4	78.6	0	0
	10 min	0	0	21.6	78.4	-	-
21	0 min	0	0	21.7	78.3	0	0
	10 min	0	0	21.8	78.2	-	-
22	0 min	0	0	21.9	78.1	0	0
	10 min	0	0	21.4	78.6	-	-
23	0 min	0	0	21.4	78.6	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
24	0 min	0	0	21	79	0	0
	10 min	0	0	21.2	78.8	-	-
25	0 min	0	0	21.4	78.6	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-
26	0 min	0	0	21.6	78.4	0	0
	10 min	0	0	21.4	78.6	-	-
27	0 min	0	0	22.1	77.9	0	0
	10 min	0	0	21.9	78.1	-	-
28	0 min	0	0	21.9	78.1	0	0
	10 min	0	0	22	78	-	-
29	0 min	0	0	21.7	78.3	0	0
	10 min	0	0	21.8	78.2	-	-
30	0 min	0	0	21.1	78.9	0	0
	10 min	0	0	21.2	78.8	-	-
31	0 min	0	0	21.3	78.7	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
32	0 min	0	0	21.7	78.3	0	0
	10 min	0	0	21.8	78.2	-	-

Lisa 2 järg

**Tabel 2.2.** 30.07.2017 mõõdetud prügilagaasi koostis Sillamäe prügila kattekihis 50 cm sügavusel

JRK	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)
2	0	0.7	20.3	79
3	0	0.4	20.3	79.3
4	0	0.7	19.2	80.1
5	0	0.1	19.8	80.1
6	0	2.4	18.6	79
7	0	0.3	19.5	80.2
8	0	0.3	19.4	80.3
9	0	0.5	19.4	80.1
10	0	0.1	19.7	80.2
11	0	3.5	17.2	79.3
12	0	1.4	18.5	80.1
13	0	0.2	19.9	79.9
14	0.1 - 0.9	0.1	20.3	79.5
15	0	2.3	19.1	78.6
16	0 - 0.3	0.1	20.7	79.2
17	0	0.5	19.7	79.8
18	0	0.3	20.9	78.8
19	0	0.9	20.2	78.9
20	0	0.4	20.8	78.8
21	20.2	19.9	0.3	59.6
22	0	1.1	20.3	78.6
23	0	0.8	20.6	78.6
24	0	0.3	20.7	79
25	0	0.1	21.2	78.7
26	0	4.5	16.5	79
27	0	0.2	21.1	78.7
28	0	0.3	20.9	78.8
29	0	1.4	19.8	78.8
30	0	0.9	20.5	78.6
32	0	1.6	19.9	78.5
33	0	0.2	20.4	79.4

Lisa 2 järg

**Tabel 2.3.** Sillamäe prügilä pinnalt prügilagaaside mõõtmiste tulemused 03.09.2017

JRK	Aeg	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	CH <sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min	CO <sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min
4	0 min	0	0	20.8	79.2	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
5	0 min	0	0	21	79	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
6	0 min	0	0.1	21.7	78.2	0	0
	10 min	0	0.1	21.6	78.3	-	-
6.1	0 min	0	0.1	21.6	78.3	0	0
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
6.2	0 min	0	0.1	21.5	78.4	0	0
	10 min	0	0.1	21.3	78.6	-	-
6.3	0 min	0	0.1	21.4	78.5	0	0
	10 min	0	0.1	21.2	78.7	-	-
7	0 min	0	0	21.3	78.7	0	0
	10 min	0	0	21.2	78.8	-	-
9	0 min	0	0	21.5	78.5	0	0
	10 min	0	0	21.2	78.8	-	-
10	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-
11	0 min	0	0.1	21.6	78.3	0	0
	10 min	0	0.1	21.3	78.6	-	-
11.1	0 min	0	0.1	21.3	78.6	0	0
	10 min	0	0.1	21.3	78.6	-	-
11.2	0 min	0	0.1	21.4	78.5	0	0
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
11.3	0 min	0	0.1	21.6	78.3	0	0
	10 min	0	0.1	21.7	78.2	-	-
12	0 min	0	0.2	22	77.8	0.1	0.2
	10 min	0.1	0.4	21.8	77.7	-	-
14	0 min	0	0.1	22.2	77.7	0	0
	10 min	0	0.1	22.2	77.7	-	-
15	0 min	0	0.1	21.2	78.7	0	0
	10 min	0	0.1	21.1	78.8	-	-
15.1	0 min	0	0.1	21.2	78.7	0	0
	10 min	0	0.1	21.2	78.7	-	-
15.2	0 min	0	0.1	21.3	78.6	0	0
	10 min	0	0.1	21.4	78.5	-	-
15.3	0 min	0	0.1	21.4	78.5	0	0
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
16	0 min	0	0.2	21.4	78.4	0	-0.1

JRK	Aeg	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	CH <sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min	CO <sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min
	10 min	0	0.1	21.6	78.3	-	-
17	0 min	0	0	21.4	78.6	0	0
	10 min	0	0	21.4	78.6	-	-
18	0 min	0	0	21.2	78.8	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-
19	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-
21	0 min	0	0.1	21.5	78.4	0.3	0.3
	10 min	0.3	0.4	21.1	78.2	-	-
21.1	0 min	0	0	21.6	78.3	0	0.1
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
21.2	0 min	0	0	21.5	78.5	0	0.1
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
21.3	0 min	0	0	21.6	78.4	0	0
	10 min	0	0	21.6	78.4	-	-
22	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-
24	0 min	0	0.1	22	77.9	0	0
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-
25	0 min	0	0.1	22	77.9	0	0
	10 min	0	0.1	22	77.9	-	-
26	0 min	0	0	21.7	78.3	0	0.1
	10 min	0	0.1	21.7	78.2	-	-
26.1	0 min	0	0.1	21.8	78.1	0	0
	10 min	0	0.1	21.7	78.2	-	-
26.2	0 min	0	0.1	21.8	78.1	0	0.2
	10 min	0	0.3	21.5	78.2	-	-
26.3	0 min	0	0.1	21.9	78	0	0
	10 min	0	0.1	22	77.9	-	-
27	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22.2	77.7	-	-
29	0 min	0	0.1	22	77.9	0	0
	10 min	0	0.1	22.2	77.7	-	-
30	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22	77.9	-	-
32	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-
33	0 min	0	0.1	22.2	77.7	0	0
	10 min	0	0.1	22.2	77.7	-	-
34	0 min	0	0.1	22.2	77.7	0.1	0.1
	10 min	0.1	0.2	22.1	77.6	-	-
K1	0 min	0	0	21.3	78.7	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-

<b>JRK</b>	<b>Aeg</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min</b>
K2	0 min	0	0.1	22.2	77.7	0	0
	10 min	0	0.1	22.2	77.7	-	-
K3	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-

Lisa 2 järg

**Tabel 2.4.** 02.09.2017 mõõdetud prügilagaasi koostis Sillamäe prügila kattekihis 50 cm sügavusel

JRK	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)
2	0	1	20.7	78.3
4	0	1	21	78
5	0	0.3	21.4	78.3
6	0	0.4-3.4	21.6	78
6.1	0	1.3-5.8	20.9	77.8
6.2	0	4.9	18.4	76.7
6.3	0	0.6	21.6	77.8
7	0	1	21.4	77.6
9	0	0.7	21.8	77.5
10	0.1	0.2	22	77.7
11	0	0.6	21.4	78
11.1	0.1-0.5	1.9	20.4	77.6
11.2	0.1-0.5	4	21.5	78
11.3	0-0.3	0.5	21.6	77.9
12	4.7	5.5	17.5	72.3
13	0	0.2	19.9	79.9
14	0.3	0.2	21.9	77.6
15	0	2.3	19.1	78.6
15.1	0	1.4-4.6	21	77.6
15.2	0	0.8	21.5	77.7
15.3	0-0.1	0.2	21.9	77.9
16	0 - 0.3	0.2	21.6	78.2
17	0	0.4	21.9	77.7
18	0	0.3	20.9	78.8
19	0	0.9	21.5	77.6
20	0	0.4	20.8	78.8
21	8	6.5	15.5	70

<b>JRK</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>
21.1	0	0.3	21.9	77.9
21.2	0	1.3	21	77.7
21.3	0	0.3	21.8	77.9
22	0	0.8	21.5	77.7
23	0	2.5	20.1	77.4
24	0.1	0.2	21.9	77.8
25	0	0.3	21.9	77.8
26	0	6.7	14.4	78.9
26.1	0	3.4	18.5	78.1
26.2	0	7.2	13.6	79.2
26.3	0	0.6	21.5	77.9
27	0	0.4	21.5	78.1
28	0	0.3	20.9	78.8
29	0	4	18.7	77.3
30	0.1	0.3	21.8	77.8
32	0	1	21.4	77.6
33	0	0.2	22.1	77.7
34	4.7	3	19.6	72.7
K1	0	0.6	21.6	77.8
K2	0	1.2	21.3	77.5
K3	14.9	17.6	0.7	66.8

Lisa 2 järg

**Tabel 2.5.** Sillamäe prügila pinnalt prügilagaaside mõõtmiste tulemused 21.10.2017-22.10.2017

JRK	Aeg	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	CH <sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min	CO <sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min
4	0 min	0	0.1	21.9	78	0	0.1
	10 min	0	0.2	21.5	78.3	-	-
5	0 min	0	0.1	22.5	77.4	0	0
	10 min	0	0.1	22	77.9	-	-
6	0 min	0	0.1	22.5	77.4	0	0.1
	10 min	0	0.2	22.5	77.3	-	-
6.1	0 min	0	0.1	22	77.9	0	0
	10 min	0	0.1	22.3	77.6	-	-
6.2	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0.1
	10 min	0	0.2	22.4	77.4	-	-
6.3	0 min	0	0.1	22.4	77.5	0	0
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
7	0 min	0	0.1	21.5	77.7	0	0
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
9	0 min	0	0.1	21.8	78.1	0	0
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-
10	0 min	0	0.1	22.4	77.5	0	0
	10 min	0	0.1	22.3	77.6	-	-
11	0 min	0	0.1	22.4	77.5	0	0
	10 min	0	0.1	22.3	77.6	-	-
11.1	0 min	0	0.1	22.5	77.4	0	0
	10 min	0	0.1	22.4	77.5	-	-
11.2	0 min	0	0.1	22.4	77.5	0	0
	10 min	0	0.1	22.7	77.2	-	-
11.3	0 min	0	0.1	22.4	77.5	0	0.1
	10 min	0	0.2	22.4	77.4	-	-
12	0 min	0.3	0.3	22.4	77	0.1	0.1
	10 min	0.4	0.4	22.3	76.9	-	-
12.1	0 min	0.1	0.1	22.8	77	-	-
	10 min	0.2	0.2	22.6	77		
12.2	0 min	0	0.1	22.5	77.4	0.2	0.2
	10 min	0.2	0.3	22.3	77.2	-	-
12.3	0 min	0	0.1	22.6	77.3	0	0
	10 min	0	0.1	22.7	77.2	-	-
14	0 min	0	0.1	22.5	77.4	0	0
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
15	0 min	0	0.1	22.5	77.4	0	0
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
15.1	0 min	0	0.1	22.3	77.6	0	0



JRK	Aeg	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	CH <sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min	CO <sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
15.2	0 min	0	0.1	22	77.9	0	0.1
	10 min	0	0.2	22.5	77.3	-	-
15.3	0 min	0	0.1	22.6	77.3	0	0
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
17	0 min	0	0	22.2	77.8	-	-
	10 min	0	0.1	22.4	77.5		
19	0 min	0	0.1	21.8	78.1	0	0.1
	10 min	0	0.2	22.1	77.7	-	-
21	0 min	0.5	0.5	22.2	76.8	0.5	0.5
	10 min	1	1	21.9	76.1	-	-
21.1	0 min	0.1	0.1	22.5	77.3	-0.1	0.1
	10 min	0	0.2	22.4	77.4	-	-
21.2	0 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
	10 min	0	0.1	22.5	77.4		
21.3	0 min	0	0.1	22.5	77.4	0	0
	10 min	0	0.1	22.5	77.4	-	-
22	0 min	0	0.1	21.8	78.1	0	0.1
	10 min	0	0.2	22.1	77.7	-	-
25	0 min	0	0.1	22.7	77.2	0	0
	10 min	0	0.1	22.7	77.2	-	-
26	0 min	0	0.1	21.5	78.4	0	0
	10 min	0	0.1	21.9	78	-	-
26.1	0 min	0	0.1	22	77.9	0	0
	10 min	0	0.1	22.4	77.5	-	-
26.2	0 min	0	0.1	22.5	77.4	-	-
	10 min	0	0.1	22.7	77.2		
26.3	0 min	0	0.1	22.7	77.2	0	0
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
27	0 min	0	0.2	22.1	77.7	0	0
	10 min	0	0.2	22.5	77.3	-	-
29	0 min	0	0.1	22.6	77.3	0	0
	10 min	0	0.1	22.7	77.2	-	-
30	0 min	0	0.1	22.6	77.3	0	0
	10 min	0	0.1	22.6	77.3	-	-
32	0 min	0	0.1	22.7	77.2	0	0
	10 min	0	0.1	22.8	77.1	-	-
33	0 min	0	0.1	22.1	77.8	0	0
	10 min	0	0.1	22.5	77.4	-	-
34	0 min	1.2	0.9	22.1	75.8	0.3	7
	10 min	1.5	7.9	15	75.6	-	-
K1	0 min	0	0.1	21.5	78.4	0	0.1
	10 min	0	0.2	21.5	78.3	-	-

<b>JRK</b>	<b>Aeg</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min</b>
K2	0 min	0	0.1	22.3	77.6	0	0
	10 min	0	0.1	22.4	77.5	-	-
K3	0 min	0.1	0.2	22.7	77	0.1	0.1
	10 min	0.2	0.3	22.6	76.9	-	-

Lisa 2 järg

**Tabel 2.6.** 21.10.2017 mõõdetud prügilagaasi koostis Sillamäe prügila kattekihis 50 cm sügavusel

JRK	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)
4	0	0.5	21.7	77.8
5	0	0.1	21.8	78.1
6	0	0.2	22.3	77.5
6.1	0	2.2	20.8	77
6.2	0.1	2.9	19.6	77.4
6.3	0	0.2	22.7	77.1
7	0	0.4	22.9	76.7
9	0	1.2	22.2	76.6
10	0.1	0.2	23.1	76.6
11	0	0.1	22.8	77.1
11.1	1	0.8	22.6	76.6
11.2	0.1	0.2	23	76.7
11.3	0.3	0.4	22.8	76.5
12	18.4	10.6	12.3	58.7
12.1	0.2	0.3	22.8	76.7
12.2	2.9	2	21.3	73.8
12.3	0	0.2	22.9	76.9
13	0	0.2	19.9	79.9
14	0.3	0.3	22.7	76.7
15	0.1	0.2	22.8	76.9
15.1	0	0.2	22.8	77
15.2	0	0.6	22.5	76.9
15.3	0.3	0.3	22.7	76.7
16	0.1	0.2	22.8	76.9
17	0	0.3	22.7	77
19	0	0.2	22.7	77.1
20	0	0.4	20.8	78.8
21	0.2	0.4	22.6	76.8
21.1	0	0.2	22.7	77.1
21.2	0	0.2	22.8	77
21.3	0	0.6	22.5	76.9
22	0.1	0.3	22.2	77.4
23	0	2.5	20.1	77.4
24	0.1	0.2	22.8	76.9
25	0.3	0.2	22.7	76.8
26	0	0.3	22.7	77
26.1	0	0.8	22.4	76.8
26.2	0	3.5	21	75.4
26.3	0	0.3	22.6	77.1
27	0	0.2	22.8	77
29	0	0.2	22.8	77

<b>JRK</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>
30	0.2	0.3	22.6	76.9
32	0	0.2	22.8	77
33	0	0.2	22.8	77
34	40.9	22.8	0.7	35.6
K1	1.2	1.8	20.4	76.6
K2	0.3	0.5	22.2	77
K3	0.6	0.7	22.1	76.6

Lisa 2 järg

**Tabel 2.7.** Sillamäe prügila pinnalt prügilagaaside mõõtmiste tulemused 04.05.2017-05.05.2018

JRK	Aeg	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	CH <sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min	CO <sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min
5	0 min	0	0	21.8	78.2	0	0
	10 min	0	0	22.1	77.9	-	-
6	0 min	0	0.1	20.3	79.6	0	0.2
	10 min	0	0.3	20.8	78.9	-	-
6.1	0 min	0	0	21.5	78.5	0	0
	10 min	0	0	21.9	78.1	-	-
6.2	0 min	0	0.1	20.9	79	0	0.2
	10 min	0	0.3	21.2	78.5	-	-
6.3	0 min	0	0.2	21.1	78.7	0	0.2
	10 min	0	0.4	21.7	77.9	-	-
7	0 min	0	0	20.9	79.1	0	0
	10 min	0	0	21.1	78.9	-	-
9	0 min	0	0	21.8	78.2	0	0.1
	10 min	0	0.1	22.1	77.8	-	-
10	0 min	0	0	21.7	78.9	0	0
	10 min	0	0	21.7	78.3	-	-
11	0 min	0	0	21.2	78.8	0	0
	10 min	0	0	21.3	78.7	-	-
11.1	0 min	0	0.1	20.8	79.1	0	0
	10 min	0	0.1	21.2	78.7	-	-
11.2	0 min	0	0	21.6	78.4	0	0.1
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
11.3	0 min	0	0	21.4	78.6	0	0
	10 min	0	0	21.7	78.3	-	-
12	0 min	0	0.1	22.2	77.7	0	0
	10 min	0	0.1	21.2	78.7	-	-
14	0 min	0	0.1	20.6	79.3	0	0
	10 min	0	0.1	20.7	79.2	-	-
15	0 min	0	0	21.5	78.5	0	0
	10 min	0	0	21.7	78.3	-	-
15.1	0 min	0	0	21.3	78.7	0	0
	10 min	0	0	21.4	78.6	-	-
15.2	0 min	0	0.1	21.1	78.8	0	0
	10 min	0	0.1	21.3	78.6	-	-
15.3	0 min	0	0	21.2	78.8	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-
16	0 min	0	0	21.6	78.4	0	0.1
	10 min	0	0.1	21.4	78.5	-	-
17	0 min	0	0	21.4	78.6	0	0

<b>JRK</b>	<b>Aeg</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min</b>
	10 min	0	0	21.2	78.8	-	-
19	0 min	0	0.1	21.3	78.6	0	0
	10 min	0	0.1	21.4	78.5	-	-
21	0 min	0	0.1	21.8	78.1	0	0
	10 min	0	0.1	21.7	78.2	-	-
21.1	0 min	0	0.1	20.8	79.1	0	0
	10 min	0	0.1	20.6	79.3	-	-
21.2	0 min	0	0.1	20.5	79.4	0	0
	10 min	0	0.1	20.3	79.6	-	-
21.3	0 min	0	0	20.7	79.3	0	0.1
	10 min	0	0.1	20.5	79.4	-	-
22	0 min	0	0.2	21.7	78.1	0	0.1
	10 min	0	0.3	21.4	78.3	-	-
23	0 min	0	0	21.3	78.7	0	0.1
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
24	0 min	0	0.1	21.4	78.5	0	0
	10 min	0	0.1	21.3	78.6	-	-
25	0 min	0	0	21.7	78.3	0	0
	10 min	0	0	21.3	78.7	-	-
26	0 min	0	0.1	21.6	78.3	0	0
	10 min	0	0.1	21.8	78.1	-	-
26.1	0 min	0	0.1	20.4	79.5	0	0.2
	10 min	0	0.3	21	78.7	-	-
26.2	0 min	0	0.1	20.1	79.8	0	0
	10 min	0	0.1	20.3	79.6	-	-
26.3	0 min	0	0	21.3	78.7	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-
27	0 min	0	0	21.5	78.5	0	0
	10 min	0	0	21.7	78.3	-	-
28	0 min	0	0	21.6	78.4	0	0
	10 min	0	0	21.8	78.2	-	-
29	0 min	0	0.1	21.3	78.6	0	0
	10 min	0	0.1	21.5	78.4	-	-
30	0 min	0	0	21.6	78.4	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-
31	0 min	0	0	21.8	78.2	0	0
	10 min	0	0	21.6	78.4	-	-
32	0 min	0	0	21.3	78.7	0	0
	10 min	0	0	21.5	78.5	-	-
33	0 min	0	0	21.8	78.2	0	0
	10 min	0	0	21.9	78.1	-	-
34	0 min	0	0.1	21.2	78.7	0	0.1
	10 min	0	0.2	21.2	78.6	-	-

<b>JRK</b>	<b>Aeg</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%) 10 min - 0 min</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%) 10 min - 0 min</b>
K1	0 min	0	0.1	21.1	78.8	0	0
	10 min	0	0.1	21.3	78.6	-	-
K2	0 min	0	0.1	20.7	79.2	0	0
	10 min	0	0.1	20.9	79	-	-
K3	0 min	0	0.1	21.4	78.5	0	0
	10 min	0	0.1	21.3	78.6	-	-

Lisa 2 järg

**Tabel 2.8.** 04.05.2018 mõõdetud prügilagaasi koostis Sillamäe prügila kattekihis 50 cm sügavusel

JRK	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)
2	0	0.9	20.3	78.8
5	0	0.1	21.2	78.7
6	0	2.7	19.3	78
6.1	0	0.3	20.9	78.2
6.2	0	4.8	17	78.2
6.3	0	6.1	16.5	77.4
7	0	2.2	20.2	77.6
9	0	0.5	21.5	78
10	0	0.1	21	78.9
11	0	0.5	21	78.5
11.1	0.1	1.3	20.4	78.2
11.2	0	0.9	20.8	78.3
11.3	0	0.4	21	78.6
12	0	0.2	21.4	78.4
14	2.1	1.3	19.4	77.2
15	0	0.8	21.2	78.1
15.1	0	0.4	21.3	78.3
15.2	0	0.9	20.8	78.3
15.3	0	0.1	21.4	78.5
16	0	0.1	21.5	78.4
17	0	0.2	21.3	78.5
19	0.2	0.3	21.4	78.1
20	0	0.2	21.5	78.3
21	0	11.2	11.3	77.5
21.1	0	0.1	21.6	78.3
21.2	0	0.1	21.6	78.3
21.3	0	0.6	21.2	78.2
22	0	1.2	20.8	78
23	0	0.3	21.2	78.5
24	0	0.2	21.5	78.3
25	0	0.2	21.5	78.3
26	0	6.5	15.8	77.7
26.1	0	2.6	19.7	77.7
26.2	0	2.4	19.6	78
26.3	0	0.2	21.8	78
27	0	0.2	21.5	78.3
28	0	0.3	21.4	78.3
29	0	1	21	78
30	0	0.4	21.6	78
31	0	0.1	21.8	78.1
32	0	0.4	21.5	78.1



<b>JRK</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>BAL (%)</b>
33	0	0.2	21.5	78.3
34	1.2	0.9	20.6	77.3
K1	0	4.9	18.2	76.9
K2	0	0.4	20.7	78.9
K3	0.1	0.3	20.9	78.7

## LISA 3. Sillamäe prügila kattekihi kaevamise tulemused

**Tabel 3.1.** 03.04.2018 Sillamäe prügila kaevamise andmed ja tulemused

Koordinaadid		Sillamäe, 3. aprill 2018								Kolme mõõtmise keskmine	
x	y	JRK	Sügavus (m)	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	NH3 (ppm)	H2S (ppm)	BAL (%)	Niiskus (%)	Temperatuur
59.356068	27.77771	TP1 pinnalt	0	0	0.1	22.2	0	0	77.7	maa oli jääs	
		1.1	0.7	0.1	0.6	22	0	0	77.3	19	5.8
		1.2	1.2	0.3	1.5	21.2	0	0	77	16.5	7.7
		1.3	1.7	0.3	1.1	21.7	0	0	76.9	27	8.4
Puudus gaasijaotuskiht, 20 cm maapind jääs, hakkepuit mullaga, alates 0.75 cm prügi ja kile											
59.356537	27.77867	TP2 pinnalt	0	0	0.1	22.7	0	0	77.2	maa oli jääs	
		2.1	0.7	0.8	0.8	21.3	0	0	77.1	28.9	5
		2.2	1.2	4.6	3.2	18.5	0	0	73.7	19.2	7.4
		2.3	1.7	5.2	4	17.2	0	0	73.6	21.9	9.5
Puudus gaasijaotuskiht, 20 cm maapind jääs, hakkepuit mullaga, alates 0.75 cm prügi ja kile											
59.35673	27.77909	TP3 pinnalt	0	0	0.1	22.7	0	0	77.2	maa oli jääs	
		3.1	0.7	0.5	1.5	21.3	0	0	76.7	38.7	4.8
		3.2	1.2	0.1	1.3	21.4	0	0	77.2	-	5.6
		3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	6.2
Gaasijaotuskiht algas 1.2 meetri pealt, oli väga kõva - ei saanud vardaga mõõta											
59.356547	27.77799	TP4 pinnalt	0	0	0.1	22.7	0	0	77.2	maa oli jääs	
		4.1	0.7	0	0.2	21.9	0	0	77.9	25.8	4.3
		4.2	1.2	0.6	0.4	21.4	0	0	77.6	55.03	6.1
		4.3	-	-	-	-	-	-	-	-	6.6
Gaasijaotuskiht algas 1.2 m pealt - ei saanud sügavamalt vardaga mõõta, esimesed 0.5 m oli muld,											

**Tabel 3.2.** Sillamäe prügila kattekihi hapnikutarve ja metaani lagundamise kiirus

Proov	7-päeva hapnikutarve, (mgO <sub>2</sub> /g KA)	Metaani lagundamise kiirus (mmol/(g*d))
TP1 0 – 0.5 m	3.7	54
TP1 0.5 – 1 m	2.3	35
TP1 1 – 1.5 m	1.8	20
TP2 0 – 0.5 m	5.2	45
TP2 0.5 – 1 m	5.7	114
TP2 1 – 1.5 m	3.2	32
TP3 0 – 0.5 m	1.6	27
TP3 0.5 – 1 m	1.7	16
TP3 1 – 1.35 m	1.4	18
TP4 0 – 0.5 m	2.3	23
TP4 0.5 – 1 m	4.2	24
TP4 1 – 1.25 m	3.6	16

**Tabel 3.3.** Sillamäe prügilast kogutud pinnaseproovide sõelanalüüsi tulemused protsentides

<b>Läbimõõt</b>	8-10 mm	6,3-8 mm	4-6,3 mm	2-4 mm	Alla 2 mm
<b>Proov</b>					
TP1 (0-0,5)	1.3%	6.1%	15.0%	22.8%	54.8%
TP1 (0,5-1,0)	3.2%	10.1%	22.0%	27.9%	36.9%
TP1 (1-1,5)	4.6%	11.2%	24.7%	32.6%	26.9%
TP2 (0-0,5)	5.0%	12.2%	25.4%	35.2%	22.1%
TP2 (0,5-1,0)	3.5%	8.7%	19.2%	27.1%	41.5%
TP2 (1-1,5)	6.2%	11.0%	21.2%	31.4%	30.2%
TP3 (0-0,5)	2.9%	8.4%	19.9%	27.8%	41.0%
TP3 (0,5-1,0)	3.5%	8.8%	19.2%	25.5%	43.0%
TP3 (1-1,35)	1.7%	7.5%	17.5%	25.3%	48.1%
TP4 (0-0,5)	4.9%	11.8%	21.8%	27.6%	33.9%
TP4 (0,5-1,0)	3.0%	8.3%	18.7%	26.2%	43.7%
TP4 (1-1,25)	2.2%	5.9%	13.8%	25.3%	52.7%

**Lihthitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Siim Sellik,  
sünniaeg 20.07.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihthitsentsi) enda loodud lõputöö  
„Sillamäe prügila metaanilagunduskatte uuring“,

mille juhendaja on Mait Kriipsalu ja Valdo Kuusemets,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihthitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 22.05.2018

---

**Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)